

**UNIVERSIDAD DE CIENCIAS Y
ARTES DE CHIAPAS**

FACULTAD DE INGENIERÍA

T E S I S

**Diseño y construcción de un sistema integral
anaerobio-humedal para la eliminación de
residuos de diclofenaco y paracetamol
contenidos en aguas residuales**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
**DOCTOR EN CIENCIAS EN
DESARROLLO SUSTENTABLE**

PRESENTA
AUZANIA SUSI MICELI MONTESINOS

Tuxtla Gutiérrez, Chiapas

Febrero de 2016



**UNIVERSIDAD DE CIENCIAS Y
ARTES DE CHIAPAS**

FACULTAD DE INGENIERÍA

T E S I S

**Diseño y construcción de un sistema integral
anaerobio-humedal para la eliminación de
residuos de diclofenaco y paracetamol
contenidos en aguas residuales.**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

**DOCTOR EN CIENCIAS EN
DESARROLLO SUSTENTABLE**

PRESENTA

AUZANIA SUSI MICELI MONTESINOS

**DRA. MA. NEFTALÍ ROJAS VALENCIA
DIRECTORA EXTERNA**

Instituto de Ingeniería-UNAM

**DRA. CAROLINA ORANTES GARCÍA
DIRECTORA INTERNA**

Instituto de Ciencias Biológicas-UNICACH

ASESORES

DRA. DAISY ESCOBAR CASTILLEJOS (UNACH)

DR. HUGO ALEJANDRO GUILLÉN TRUJILLO (UNACH)

Tuxtla Gutiérrez, Chiapas

Febrero de 2016





UNIVERSIDAD DE CIENCIAS Y ARTES DE CHIAPAS

SECRETARÍA ACADÉMICA
DIRECCIÓN DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO



Tuxtla Gutiérrez, Chiapas
03 de marzo de 2016
Oficio No. DIP-332/2016

C. Auzania Susi Miceli Montesinos
Candidata al Grado de
Doctora en Ciencias en Desarrollo Sustentable
Presente.

En virtud de que se me ha hecho llegar por escrito la opinión favorable de la Comisión Revisora que analizó su trabajo de tesis denominado **“Diseño y Construcción de un Sistema Integral Anaerobio-Humedal para la Eliminación de Residuos de Diclofenaco y Paracetamol contenidos en Aguas Residuales”** y que dicho trabajo cumple con los criterios metodológicos y de contenido, esta Dirección a mi cargo le **autoriza la impresión** del documento mencionado, para la defensa oral del mismo, en el examen que usted sustentará para obtener el Grado de Doctora en Ciencias en Desarrollo Sustentable. Se le pide observar las características normativas que debe tener el documento impreso y entregar en esta Dirección un tanto empastado del mismo.

Atentamente

“Por la Cultura de mi Raza”

Dra. María Adelina Schlie Guzmán
Directora.



DIRECCIÓN DE INVESTIGACIÓN
Y POSGRADO

C.c.p. Expediente

Tesis presentada por _____

Miceli Montesinos Auzania Susi

Aspirante al Título de:

Doctor en Ciencias en Desarrollo Sustentable

Aceptada por el Comité Tutorial:



Dra. María Neftalí Rojas Valencia

Directora de Tesis



Dra. Carolina Orantes García

Co-Directora



Dra. Daisy Escobar Castillejos

Asesor



Dr. Hugo Alejandro Guillén Trujillo

Asesor

Febrero 2016.

Dedicatoria

A mi señora madre, ***Esperanza Montesinos Viuda de Miceli***

A mi señor padre ***Adolfo Miceli Sánchez***, en memoria Q. P.D.

A mis hermanos, sobrinos y tíos que me brindaron su apoyo moral en este trabajo.

Agradecimientos

Al Comité tutorial:

Dra. Ma. Neftalí Rojas Valencia del Instituto de Ingeniería-Universidad Autónoma de México (UNAM).

Dra. Carolina Orantes García del Instituto de Ciencias Biológicas-Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas (UNICACH).

Dra. Daisy Escobar Castillejos de la Facultad de Ingeniería Civil-Universidad Autónoma de Chiapas (UNACH).

Dr. Hugo Alejandro Guillén Trujillo de la Facultad de Ingeniería Civil-Universidad Autónoma de Chiapas (UNACH).

A la sección de posgrado de Ingeniería Civil de la UNACH por la sede de la Planta Experimental.

Al personal del laboratorio de calidad del agua de la Facultad de Ingeniería Civil-UNACH.

Al personal del Organismo de Cuenca Frontera Sur- Conagua Chiapas y a todo el personal de Laboratorio de Análisis de Aguas:

Q.F.B. Ma. Del Pilar Palacios Jiménez, jefe del Laboratorio-Conagua.

Ing. Q. Francisco de los Santos, Jefe de Programa de Calidad del Agua- Conagua.

Al Dr. Celestino Odín Rodríguez Nava. Jefe del Laboratorio de Sistemas Ambientales de Escuela Nacional Ciencias Biológicas - Instituto Politécnico Nacional.

Al profesor Ing. José Francisco Martínez, del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez; por facilitar equipo para medición de pH y temperatura.

Al Sistema Municipal de Agua Potable y Alcantarillado, SMAPA por la donación de plantas acuáticas.

Al Dr. Freddy Eugenio Penagos García, por apoyar en la colección de plantas, en la Rivera de Cupía.

Al Dr. Javier Gutiérrez, por el apoyo otorgado a los análisis microbiológicos en el sistema experimental.

A la Comisión Federal para la Protección Contra Riesgos Sanitarios- SSA. Por la aportación de insumos de los análisis de los fármacos.

Sr. Adrián Ramírez Rojas, Farmacias Santa Cruz, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. Por su aportación de recursos para transporte a la 2a. Conferencia Panamericana Internacional.

A M. en C. Manuel Antonio de la Cruz Santos-UNACH. Por sus sugerencias para la escritura del presente trabajo.

A M. en C. José Alonso Figueroa Gallegos- UNACH. Por sus valiosas sugerencias.

A todos mis colegas y amigos en el México D.F. que me apoyaron en todos los trámites realizados.

A todos mis compañeros de UNICACH y UNACH, que me brindaron valiosas sugerencias.

GRACIAS UNICACH, GRACIAS A TODOS

ÍNDICE GENERAL

Página

	AGRADECIMIENTOS	
	ÍNDICE DE FIGURAS _____	i
	ÍNDICE DE CUADROS _____	iii
	RESUMEN _____	iv
I	INTRODUCCIÓN _____	1
II	MARCO TEÓRICO _____	3
2.1	Contaminantes Emergentes (CE) _____	3
2.2	Residuos de fármacos _____	4
2.3	Tratamientos de aguas residuales _____	7
2.4	Humedales _____	8
2.4.1	Clasificación de humedales _____	10
2.5	Tipos de humedales construidos para tratar fármacos _____	11
2.6	Mecanismos de acción de los humedales _____	16
2.7	Descripción de las especies utilizadas _____	18
2.7.1.	Familia <i>Cyperaceae</i> _____	18
2.7.1.1	Género <i>Cyperus</i> L. _____	19
2.7.1.2	<i>Cyperus</i> L. _____	20
2.7.1.2.1	Hábitat y ecología _____	20
2.7.1.2.2	Distribución _____	21
2.7.1.2.3	Aprovechamiento _____	21
2.7.2.	Familia <i>Typhaceae</i> _____	22
2.7.2.1	Género <i>Typha</i> L. _____	22
2.7.2.2	<i>Typha angustifolia</i> L. _____	23
2.7.2.2.1	Hábitat y ecología _____	24
2.7.2.2.2	Distribución _____	25
2.7.2.2.3	Aprovechamiento _____	25
III.	ANTECEDENTES _____	26
3.1	En México _____	27
3.2	Tecnologías para la remoción de contaminantes fármacos _____	30
3.3	Tecnologías fisicoquímicas _____	31
3.4	Tecnologías biológicas _____	33
3.5	Tecnologías avanzadas _____	33
3.6	Tecnologías combinadas _____	35
IV.	OBJETIVOS _____	37
4.1	Objetivo general _____	37
4.2	Objetivos específicos _____	37
V.	HIPÓTESIS _____	37
VI.	ÁREA DE ESTUDIO _____	38
6.1	Ubicación geográfica _____	38
6.2	Situación geográfica _____	39

6.3	Hidrología_____	40
6.4	Clima_____	40
6.5	Vegetación_____	40
6.6	Flora_____	42
6.7	Fauna_____	42
6.8	Actividades agropecuarias_____	42
6.9	Recurso agua y su tratamiento_____	42
VII.	METODOLOGÍA_____	43
7.1	Habilitación y acondicionamiento del Sistema anaerobio-humedal._____	44
7.1.1	Cálculos de trabajo para el diseño y construcción del Sistema Integral anaerobio-humedal_____	44
7.2	Desarrollo del proyecto_____	47
7.3	Determinación de porosidad del sustrato grava (sustrato)_____	48
7.4	Trayectoria que sigue el Agua Residual Sintética ARS, tratada por el biodigestor continuada por el humedal_____	50
7.5	Registros de parámetros del Sistema experimental durante la operación en el área de trabajo_____	57
7.6	Operación y mantenimiento del Sistema Integral anaerobio-humedal_____	58
7.7	Análisis de los parámetros: DBO ₅ , DQO, OD, Temperatura, pH_____	61
7.8	Para el Análisis de los residuos de fármacos en ARS tratada por el Sistema Integral-anaerobio-humedal: diclofenaco y paracetamol_____	64
VIII.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN_____	65
8.1	Resultados del diseño y construcción del Sistema Integral anaerobio-humedal_____	65
8.2	Operación y mantenimiento del Sistema Integral anaerobio-humedal_____	66
8.3	Variación de los parámetros: DBO ₅ , DQO, OD, en el Sistema Integral anaeróbico-humedal_____	69
8.4	Resultados de análisis de fármacos_____	71
IX.	CONCLUSIONES_____	84
X.	RECOMENDACIONES_____	85
XI.	BIBLIOGRAFÍA_____	86
XII.	ANEXOS_____	100
XIII.	PRODUCTO DE LA TESIS_____	106

ÍNDICE DE FIGURAS

		Páginas
Figura 1	Un sistema subterráneo típico de humedales construidos _____	11
Figura 2	Humedal construido de flujo libre (FWS)_____	13
Figura 3	Humedales construidos de flujo subsuperficial vertical (SFS)_____	13
Figura 4	Humedales construidos de flujo subsuperficial horizontal _____	14
Figura 5	Ubicación del sitio de estudio, sección de posgrado UNACH_____	39
Figuras 6.A 6.B y 6.C	A) Agregación de la grava al recipiente lleno de agua. B) Grava en el recipiente lleno de agua. C) Recipientes: lleno de grava y agua (blanco) y recipiente contenedor de agua desalojada (azul)._____	49
Figura 7	El tanque alimentador al biodigestor del Sistema Integral anaerobio- humedal._____	52
Figura 8	El Humedal del Sistema Integral anaerobio-humedal donde es tratada el agua de salida del biodigestor._____	53
Figura 9	El humedal y biodigestor del Sistema Integral anaerobio-humedal, a la derecha; que reciben el agua ARS a tratar._____	53
Figura 10	Tanque receptor de aguas tratadas finalmente por el Sistema Integral anaerobio-humedal._____	54
Figura 11	Humedal del Sistema de tratamiento de ARS._____	57
Figura 12	Gráfica comparativa de temperaturas de Sistema: Medioambiente, agua de biodigestor, agua del humedal, raíz de la planta, grava._____	58
Figura 13	Verificación de la carga y libre acceso del flujo de ARS del Sistema Integral anaerobio-humedal en tanque alimentador Rotoplas®._____	60
Figura 14	Verificación del nivel y flujo de ARS tratada por el biodigestor en el humedal, así como la poda de plantas maduras del Sistema Integral anaerobio-humedal._____	60
Figura 15	Verificación de la salida del efluente (ARS tratada) del Sistema Integral anaerobio-humedal._____	61
Figura 16	Sistema Integral anaerobio-humedal de tratamiento con tanque alimentador, tanque dosificador, biodigestor, humedal y tanque receptor de agua tratada._____	65
Figura 17	Sistema Integral anaerobio-humedal de tratamiento con dimensiones de tanque alimentador a biodigestor, tanque dosificador, biodigestor, humedal y tanque receptor de agua tratada, vista en planta._____	66
Figura 18	Gráfica de la Demanda Bioquímica de Oxígeno, DBO ₅ , del ARS tratada en el Sistema anaerobio-humedal._____	69
Figura 19	Gráfica del contenido del Oxígeno Disuelto OD, del ARS tratada por el Sistema anaerobio-humedal._____	70
Figura 20	Gráfica de la demanda Química de Oxígeno DQO, del ARS tratada en el Sistema Integral anaerobio-humedal._____	71
Figura 21	Gráfica de la concentración de diclofenaco en el ARS alimentado al biodigestor del Sistema Integral anaerobio- humedal._____	73
Figura 22	Gráfica del ARS tratada a la salida del biodigestor del Sistema integral	74

anaerobio-humedal. _____

Figura 23	Gráfica incluyen ARS sin tratar, a la salida del biodigestor y a la salida del humedal del Sistema Integral anaerobio-humedal.	75
Figura 24	Electroferograma de la degradación del diclofenaco en el Sistema Integral anaerobio-humedal. _____	78
Figura 25	Electroferograma del paracetamol en el ARS sin tratar del Sistema Integral anaerobio-humedal. _____	79
Figura 26	A) Histograma de concentración y B) Distribución normal de concentración de diclofenaco de ARS más fármacos sin tratar por el Sistema Integral anaerobio-humedal. _____	82
Figura 27	A) Histograma de concentración y B) Distribución normal de concentración de diclofenaco, en ARS más fármacos tratada por el Sistema Integral anaerobio-humedal. _____	83

ÍNDICE DE CUADROS

Páginas

Cuadro 1	Concentración ($\mu\text{g L}^{-1}$) de los medicamentos detectados en el agua. _____	6
Cuadro 2	Características y usos de especies de plantas que son utilizadas en humedales. _____	14
Cuadro 3	Ventajas y desventajas del uso de humedales construidos. _____	15
Cuadro 4	Equivalencias aproximadas entre los tipos de vegetación en Chiapas. _____	41
Cuadro 5	Formulación del Agua Residual Sintética, ARS. _____	52
Cuadro 6	Características del sitio de colección de las plantas. _____	55
Cuadro 7	Características socioeconómicas del sitio de colección de plantas. _____	56
Cuadro 8	De Normas aplicadas en los análisis de los parámetros de ARS tratadas por el Sistema anaerobio-humedal. _____	63
Cuadro 9	Concentraciones: inicial C_i y final C_e en el biodigestor del Sistema anaerobio-humedal de diclofenaco y cálculo de la constante de degradación con tiempo, TRH de 24h. _____	68
Cuadro 10	Resultados de análisis por electroforesis capilar, del fármaco diclofenaco, contenido en el ARS tratada por el Sistema anaerobio-humedal. _____	72
Cuadro 11	Eficiencias de eliminación por el Sistema Integral anaerobio-humedal de fármacos: diclofenaco. _____	76
Cuadro 12	Valores típicos de los parámetros cinéticos (proceso anaerobio). _____	77
Cuadro 13	Concentraciones De Fármacos en Aguas Residuales reportados.	81
Cuadro 14	Datos de los parámetros de referencia medioambiental: Temperatura, pH, en el Sistema experimental. _____	102
Cuadro 15	Resultados de los análisis de DBO_5 del agua ARS tratada por el Sistema Integral anaerobio-humedal. _____	103
Cuadro 16	Resultados de los análisis de OD del agua ARS tratada por el Sistema Integral anaerobio-humedal. _____	104
Cuadro 17	Resultados de los análisis de DQO del ARS tratada por el Sistema Integral anaerobio-humedal. _____	105

RESUMEN

Los contaminantes emergentes, entre los que se encuentran los fármacos, los productos de uso personal, aditivos industriales, entre otros, se ha demostrado que se hallan diseminados en el ambiente y se han detectado en fuentes de abastecimiento de agua, aguas subterráneas e incluso en agua potable, por lo que es motivo de preocupación. Las plantas convencionales de tratamiento de aguas residuales y potables no están diseñadas para eliminar estos contaminantes. Con la finalidad de buscar alternativas para la degradación de contaminantes emergentes, el presente trabajo tuvo como objetivo diseñar un sistema no convencional anaerobio-humedal para eliminar residuos de paracetamol y diclofenaco contenidos en aguas tratadas. El diseño consistió en un biodigestor con tanque dosificador, área humedal con dos especies de plantas *Cyperus alternifolius* y *Typha angustifolia*, y tanque receptor de agua tratada. El análisis de los parámetros se realizó de acuerdo a la NOM-001-SEMARNAT-1996, los estudios de diclofenaco y paracetamol se analizaron mediante electroforesis capilar. Conforme a los resultados de los parámetros del proceso se observó que la biodegradación de la materia orgánica del agua, se eliminó en un 90% en el efluente del sistema propuesto.

Obteniéndose una biodegradación en el biodigestor de $K_t \text{ velocidad de reacción}_{prom} = 4.905 \text{ días}^{-1} \pm 0.870$; con una $p < 0.05$. Con respecto a los fármacos no se detectaron en el efluente del humedal, por lo que el sistema combinado anaerobio-humedal representa una alternativa para la remoción de contaminantes emergentes en aguas residuales municipales.

Palabras clave: Fitorremediación, eliminación de CE, tratamiento por humedales, eliminación CE por procesos naturales, tecnologías verdes.

I. INTRODUCCIÓN

El crecimiento poblacional, el desarrollo tecnológico y las diversas actividades antropogénicas que los acompañan, probablemente sean las fuentes más importantes de contaminación a las aguas residuales que se han venido enriqueciendo con diversos tipos de contaminantes, como son los denominados contaminantes emergentes (CE) incluyendo los fármacos, productos de higiene personal o bien fragancias sintéticas, utilizadas en productos de limpieza (PPCPs, por sus siglas en inglés), de los que aún no se conocen los efectos específicos de cada grupo de ellos respecto al impacto que posiblemente generen a la salud pública (Henríquez, 2012; GIAS, 2014; Patiño *et al.*, 2014).

Aunque se conocen las consecuencias al ambiente acuático (Díaz y Ronco 2007); quizá por la falta de estudios intensos en este sentido no se haya establecido la normatividad que regulen las concentraciones permisibles en el derramamiento de éstos, a las descargas de la red de aguas residuales, este problema ambiental es mundial, no regional. La fuente principal de CE al medio ambiente, es debido a la amplia descarga de residuos, de las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTARs), que no están capacitadas para la eliminación de éstos (Santos, 2006).

En los últimos años, el aumento y en el consumo continuo de fármacos, tanto para uso humano como veterinario, está ocasionando un nuevo problema al medio ambiente (Vázquez *et al.*, 2011). Debido a ello, los estudios sobre el destino de estos contaminantes en el medio acuático, así como sus posibles efectos sobre el hombre y los ecosistemas se han recomendado prevenciones, en el manejo de fármacos (Gil *et al.*, 2012). Con la ingesta, los fármacos son transformados parcialmente por el organismo, a través de distintos procesos metabólicos, y liberados al medioambiente. La concentración en que estas sustancias se encuentran en el medioambiente estará en función de las cantidades manufacturadas, dosis de efecto, características farmacocinéticas, propiedades de

absorción, entre otros. Una vez liberados, los residuos de fármacos, contenidos en las descargas domiciliarias, llega a la red municipal posteriormente a las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTARs), donde son eliminados parcialmente, (Barceló y López 2011) y posteriormente descargado a los cauces receptores que puede ser el medio ambiente acuático: ríos, lagos, mar (Henríquez, 2012).

Para tratar aguas residuales con residuos de fármacos se han desarrollado diferentes tecnologías que se clasifican en fisicoquímicas, avanzadas y combinadas, cada una de ellas pueden reducir las concentraciones de fármacos, sin embargo, la mayoría de dichas tecnologías tienen costos elevados (Rodríguez *et al.*, 2006). El uso de tratamientos biológicos como es el tratamiento biológico por humedales es una tecnología eficiente, de menor costo y bajo impacto ambiental para tratar aguas con contenido de CE y PPCPs (Altmajer, 2014).

Expuesta la situación que prevalece es necesario implementar tecnologías combinadas o híbridas que permitan eliminar estos compuestos orgánicos, de moléculas complicadas que constituyen las estructuras químicas de los CE (Tejeda *et al.*, 2014). Otro factor importante en el estudio de la contaminación de aguas residuales es la falta del desarrollo de la química analítica (por vía húmeda o instrumental), para poder detectar trazas de estos CE que son del orden de ng/L a mg/L, los cuales en estas concentraciones pueden ser riesgosas a la salud humana y ecosistemas en general (García *et al.*, 2011; Henríquez, 2012; Ternes, 1998).

Buscando alternativas, para el tratamiento de aguas residuales con estos CE, es como se ha propuesto este estudio de sistemas anaerobio-humedales siendo tratamientos naturales que resultan en un 77% más económico que las plantas de tratamiento tradicionales (PTARs), algunos autores han reportado la eliminación de grupos de fármacos por medio de los humedales y se han obtenidos resultados prometedores en la eliminación de estos CE y PPCPs (Valsero *et al.*, 2010; Qing *et al.*, 2011, Bondía, 2014).

II. MARCO TEÓRICO

A medida que la población crece, incrementan sus actividades antropogénicas: domiciliaria, industriales, agroindustriales, hospitalarias, servicios médicos humanos y veterinarios, entre los principales, consecuentemente aumenta el aporte de contaminantes, a las aguas servidas como resultados de estas actividades, lo que implica la generación de una problemática en el tratamiento de éstas, por la complejidad de su composición; que es materia orgánica, residuos de químicos orgánicos e inorgánicos; además las aguas residuales han venido enriqueciendo con otros tipos de residuos contaminantes, denominados Contaminantes Emergentes, CE. Actualmente no se conocen los efectos específicos de cada uno de ellos respecto al impacto que ocasionaría a la Salud Pública, quizás por la falta de estudios más intensos en este sentido y consecuentemente no hay normatividad que regulen las concentraciones permisibles (en México no existe) en el derramamiento de éstos en las descargas de aguas residuales, este problema ambiental es mundial, no regional. La fuente principal según coinciden varios autores, son las aguas residuales domiciliarias y municipales que concurren en Plantas de Tratamiento Residual convencional y que no están adecuadas para eliminar a estos CE (Jiang *et al.*, 2013), permaneciendo en el agua y no en suelo como el caso del diclofenaco (Vázquez *et al.*, 2011) y que son los aportadores a cuerpos de aguas.

2.1 Contaminantes emergentes (CE)

El término de contaminantes emergentes (CE) generalmente se utiliza para referirse a compuestos de distinto origen y naturaleza química. Que aún no están incluidos en la Legislación Ambiental, sin embargo son tóxicos, persistentes y bioacumulables, (Altmajer, 2014).

La presencia de productos químicos farmacéuticos en el medio acuático ha sido reconocida como una preocupación (Granados y Ronco, 2007). Las vías principales de productos farmacéuticos en el medio ambiente son a través de la excreción humana, la eliminación de los productos no utilizados y por el uso agrícola. Una

amplia gama de productos farmacéuticos se ha detectado en aguas superficiales y subterráneas, asociada con la eliminación de las aguas residuales. Estos residuos farmacéuticos son transportados al ciclo del agua por diferentes rutas: las plantas de tratamiento de aguas residuales actúan como una puerta de entrada de estos productos a los cuerpos de agua, porque muchos de estos compuestos no son realmente retenidos en sus procesos y, además, porque muchos residuos farmacéuticos veterinarios son descargados directamente al ecosistema (Gil *et al.*, 2012).

Lo que ha despertado una mayor preocupación con respecto a estos fármacos ha sido el hallazgo de algunos de ellos (como el ibuprofeno, el diclofenaco, la carbamacepina o el ácido clofíbrico) en aguas potables. Según las propiedades físico-químicas de los fármacos, sus metabolitos, productos de degradación, y las características de los suelos, estas sustancias pueden llegar a alcanzar las aguas subterráneas y contaminar los acuíferos o bien quedar retenidas en el suelo y acumularse pudiendo afectar al ecosistema y a los humanos a través de la cadena trófica. A escala mundial los fármacos más usados son analgésicos, antihipertensivos y antimicrobianos. Ante esta expectativa respecto al recurso vital es necesario contar con tecnología precisa y adecuada para eliminar estos contaminantes de las aguas residuales y disponer de ellas finalmente de seguras para la Salud Pública y el Ecosistema (Gil *et al.*, 2012).

2.2 Residuos de fármacos

De acuerdo a la clasificación de Residuos peligrosos de la Organización Mundial de la Salud – OMS, según Constanza (2012), los residuos farmacéuticos incluyen:

a). Los medicamentos vencidos, sin uso, y productos farmacéuticos contaminados, drogas, vacunas, etc. También incluyen los materiales usados en una farmacia tales como botellas, también máscaras, guantes, cajas con residuos, y drogas.

b). Los de procedencia por biodegradación: transformación por vías metabólicas, el producto es consumido por organismos vivos y se transforma en el interior de los mismos.

Estos residuos son derramados por diferentes vía al sistema de drenaje que contienen residuos y metabolitos de fármacos de uso humano y veterinario (Sulaiman *et al.*, 2012, Tejeda, 2014).

También, se han estudiado, 40 medicamentos seleccionados que coinciden con los resultados más difundidos en la literatura internacional, consultado en la base de datos Science Direct (Cuadro 1). La categoría farmacológica y el número CAS (Chemical Abstracts Service por sus siglas en inglés) de cada medicamento (Ramos, 2009).

Cuadro 1.- Concentración ($\mu\text{g L}^{-1}$) de los medicamentos detectados en el agua.

Medicamento	Agua residual	Efluente de planta de tratamiento	Agua superficial
Trimetoprí	0,0002 - 10,7	0,154 - 0,39	0,00003
Sulfametoxazol	0,001 - 79,9	0,128 - 0,62	0,0001 - 0,050
Eritromicina	0,03 - 3,9	0,0006 - 1,1	0,034 - 0,0017
Claritromicin	0,46 - 1,7	0,21	0,0001 - 0,0006
Roxitromicin	0,025 - 1,7	0,54 - 0,87	0,0001 - 0,0006
Metronidazol	0,006 - 24,5	---	---
Ciprofloxacina	0,2 - 124,5	0,249 - 0,405	0,0001
Ofloxacina	0,2 - 7,6	0,600	0,0331 - 0,306
Tilosin	1,5	0,128 - 0,886	0,002 - 0,050
Diclofenaco	0,35 - 4,114	0,005 - 2,134	0, 225
Ibuprofeno	1,200 - 84	0,005 - 7,3	0,226
Naproxeno	0,700 - 17,1	0,025 - 1,847	0,068 - 0,266
Ketoprofeno	0,289 - 2,0	0,005 - 0,210	---
Indometacina	0,64 - 0,95	0,10 - 0,507	---
Ác. metanámico	---	---	0,068
Bezafibrate	0,42 - 7,60	0,005 - 4,6	0,27 - 3,1
Ác. Clofibrico	< 0,066 - 1,0	0,066 - 0,361	0,270
Fenolibrate	< 0,026	< 0,026 - 2,353	---
Gemfibrozil	0,965	0,436 - 2,366	---
Propanolol	---	0,18 - 0,676	0,025 - 0,18
Bisoprolol	---	0,190 - 0,777	0,025 - 2,0
Sotalol	---	1,32 - 2,5	1,3
Betaxolol	---	0,190	0,028
Atenolol	---	0,36 - 2,3	0,145 - 0,36
Metoprolol	---	0,777 - 4,9	1,7 - 2,200
Carbamazepina	0,325 - 2,0	0,16 - 2,1	0,460
Diazepán	20	0,5 - 0,01	---
Estradiol	0,005 - ,0139	0,0001 - 0,007	0,0024
Dietilestil bestrol	0,001 - 0,008	0,0001 - 0,020	0,0024 - 0,0075
Estrona	0,008 - 0,0302	0,0015 - 0,038	---
Ifosfamida	0,006 - 1,9	0,01 - 0,03	---
Ciclofosfamida	0,02 - 4,5	0,006 - 0,14	---
5-fluorouracilo	3,9 - 124	0,04 - 1,13	---
Doxorubicina	0,26 - 1,35	---	---
Dipirona	14	4,9	---
Codeína	5,2	3,7	---
Iopromide	0,026 - 18	0,9 - 5,2	---
Iopamidol	2,3	1,1 - 1,9	---
Iomeprol	10	1,1 - 2,3	---

Referencia: Ramos (2009).

En algunos lugares ya se han empezado a instalar depuradoras de última generación con membranas que eliminan dichos contaminantes emergentes (Aguado, 2009).

En México se tiran aproximadamente de 9 a 10% de residuos de fármacos al ambiente (Ayala *et al.*, 2010), mientras que el 30% de los ciudadanos europeos tira medicamentos caducados que acaban en los ríos, en vez de llevarlos a la farmacia o a un centro de acopio (Aguado, 2009). Los resultados comentados no quieren decir que las aguas estén más contaminadas que hace un año, sino que ahora se dispondrá de una herramienta que permite detectar más fármacos y mejor en un sólo análisis, por métodos nuevos desarrollados en química analítica (Aguado, 2009).

Los humedales construidos (CW) pueden promover la eliminación de estos compuestos farmacéuticos, como contaminantes emergentes (CE o PPCPs, por sus siglas en inglés, o SFAs también), a través de varios mecanismos que incluyen: la fotólisis, la absorción de las plantas, la degradación microbiana, y la adsorción del suelo. Se ha encontrado que existen pocos estudios sobre la tasa de extracción eliminación de fármacos por los humedales. Existe la necesidad de investigar intensamente para documentar el grado en que diversos compuestos farmacéuticos, se eliminarían a través de tratamiento con CW a gran escala (White *et al.*, 2006) y también es importante estudiar las interacciones de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) en el sistema humedal (Valverde 2010).

2.3 Tratamientos de aguas residuales

Las aguas residuales en general son ricas en materia orgánica que pueden ser tratadas para degradarlas por procesos biológicos aeróbicos, anaeróbicos y otros. Las aguas primeramente son tratadas por procesos físicos para eliminar material inerte en suspensión (Metcalf y Eddy, 1979, Crites y Tchobanoglous, 2002, Ramalho, 2003), utilizando métodos de operaciones unitarias de separación sin alterar la composición química de los contenidos contaminantes, (Metcalf y Eddy, 1998, Ramalho, 2003).

De acuerdo a las características de sus parámetros fisicoquímicos se pueden tratar por procesos biológicos aeróbico o anaeróbico, (Metcalf and Eddy, 1998) para darle disposición final, (Delgadillo, 2010).

En el proceso biológico anaeróbico, la materia orgánica se degrada de manera secuencial a expensas de los microorganismos propios de cada etapa; en el biodigestor anaeróbico, (Ramalho, 2003).

La digestión anaeróbica se inicia con la materia orgánica que son compuestos orgánicos complejos: carbohidratos, proteínas, lípidos; que a través de la primera etapa: Hidrólisis dónde los compuestos orgánicos complejos (material particulado) son transformados en material disuelto más simple: azúcares, aminoácidos y otros (Lorenzo *et al.*, 2005), por medio de enzimas producidas por bacterias fermentativas que son las *bacterias hidrolíticas*, (Rodríguez, 2015).

Estos compuestos son transformados en la etapa de acidogénesis a ácidos orgánicos volátiles: ácido acético, ácido butírico, ácido propiónico, ácido valérico, ácido fórmico, y bióxido de carbono CO_2 , ácido sulfhídrico H_2S e hidrógeno H_2 transformados por medio de las *bacterias acidogénicas*, (Rodríguez, 2015).

Los productos orgánicos (acetatos más H_2 , CO_2) transformados de la etapa anterior son transformados en sustratos para las *bacterias metanogénicas* a metano CH_4 , más bióxido de carbono CO_2 . Finalmente se produce metano CH_4 a partir de acetato, por medio de las *bacterias metanogénicas*. Cuando hay sulfatos las *bacterias sulfato reductoras* compiten por el sustrato con las demás generándose ácido sulfhídrico H_2S y baja producción de metano CH_4 , consecuentemente se presentan malos olores (Rodríguez, 2015).

2.4 Humedales

Después del proceso biológico, donde se ha degradado la materia orgánica, es posible que permanezcan, como remanentes contaminantes disueltos, como

producto de la degradación biológica, en las aguas residuales tratadas, estos remanentes contaminantes, pueden ser eliminados por otras tecnologías basadas en procesos naturales como es la fitorremediación, estos necesitan de elementos naturales básicamente; como son los medios acuáticos-planta – sustrato, estos son los sistemas “humedales” (Sánchez *et al.*, 2007).

Se ha estimado que en el mundo existen 557, 000,000 ha de humedales y se calcula que actualmente, en Norteamérica, existe menos del 50 % de las áreas originalmente ocupadas por este tipo de zonas, que los colonizadores españoles primero e ingleses después encontraron a su llegada al continente (Sánchez *et al.*, 2007).

México posee apenas el 0.6% de los humedales de todo el mundo, es decir, aproximadamente 3, 318,500 ha (Sánchez *et al.*, 2007), de las cuales 1, 567,000 ha corresponden a superficies estuáricas o humedales costeros (Vidales *et al.*, 2010) y 1, 751,500 ha a humedales continentales, incluyendo algunos artificiales, (Sánchez *et al.*, 2007).

La Convención Ramsar define como humedales aquellas extensiones de marismas, pantanos, turberas o aguas de régimen natural o artificial, permanente o temporal, estancado o corriente, dulce, salobre o salado, incluyendo las extensiones de agua marina cuya profundidad en marea baja no exceda de seis metros (Berlanga *et al.*, 2008).

Los humedales históricamente durante muchos años, fueron considerados lugares inhóspitos, peligrosos y sin valor económico para el desarrollo humano. La idea de que los humedales eran tierras inútiles fue lo que provocó el mal uso y abuso de estos ecosistemas, a tal grado de modificar sus regímenes hidrológicos y ciclos de nutrientes, así como de contaminarlos, azolvarlos o destruirlos (Sánchez *et al.*, 2007).

A pesar de este reconocimiento, el término *humedal* y la importancia de su protección han empezado a ser del dominio público apenas desde la década de 1970, aun en países desarrollados. Se les ha denominado los “riñones” de la tierra, (Medina, 2015), debido a su capacidad de filtrar y absorber ciertos contaminantes dentro de los ciclos químicos e hidrológicos, así como por ser receptores de aguas naturales o artificiales, (Becerril, 2009; García *et al.*, 2011; Gil *et al.*, 2012; Jiang *et al.*, 2013)

2.4.1 Clasificación de humedales

En México Berlanga *et al.* (2008), propone un esquema para la clasificación de los humedales de México basado en el análisis comparativo de los principales sistemas de clasificación actualmente en uso. El análisis incluyó 18 clasificaciones de diferentes partes del mundo, aunque la discusión se centró en los sistemas de clasificación de los Estados Unidos y de la Convención sobre Humedales de Ramsar, además de una aproximación geomorfológica (formas terrestres) e hidrológica (régimen de agua) con la adición de los humedales artificiales propuestos por la Convención de Ramsar.

Los humedales construidos, CW (por sus siglas en inglés) pueden ser estructurados sobre el nivel del suelo o debajo del nivel del suelo; en celdas construidas de cemento u otro tipo de material incluyendo un recubrimiento impermeable; el tamaño definirá el volumen de agua residual a tratar y el costo respectivo, los componentes de un humedal, de manera general son los siguientes: Agua, sustrato, vegetación, microbiota (Tejeda *et al.*, 2014).

Los sistemas de humedales funcionan por medio de interacciones complejas de carácter fisicoquímico y microbiológico que ocurren al hacer pasar lentamente el agua residual a través de un lecho de sustrato (arena, grava, arcilla), con raíces y rizomas de vegetación emergente. Algunos de los mecanismos que intervienen en la eliminación de los compuestos farmacéuticos son la biodegradación microbiana, la

captación por las plantas (procesos y mecanismos bioquímicos), la adsorción en el lecho y la volatilización (Tejeda *et al.*, 2014). Los tipos de humedales que se reconocen en general, de acuerdo a Kadlec y Wallace (2009) son los siguientes:

- a). De flujo libre superficial, Free Water Surface (FWS).
- b). De flujo Subsuperficial, Vegetated Submerged Bed (VSB)
- c). De flujo vertical, Vertical Flow (VF)

2.5 Tipos de humedales construidos para tratar fármacos

Los humedales construidos o artificiales se usan en el ámbito mundial para tratar el alcantarillado doméstico e industrial. Un número de factores fisicoquímicos y biológicos se encuentran dentro de un humedal, que se combinan para degradar, absorber, precipitar o elimina una amplia gama de contaminantes. La Figura 1 muestra un sistema subterráneo típico de humedales construido para el tratamiento de aguas grises. El sistema puede ser construido para un solo compartimiento o un grupo de compartimientos (Quing *et al.*, 2011).

El rendimiento de estos sistemas está limitado a los parámetros de contaminación comunes, tales como los sólidos en suspensión, nutrientes y bacterias (Yocum, 2013).



Figura 1. Un sistema subterráneo típico de humedales construidos (adaptado de Hijosa-Valsero *et al.*, 2010).

Existen dos tipos de sistemas de humedales construidos desarrollados para el tratamiento de agua residual: Sistemas de Flujo Libre (FWS) y sistemas de Flujo Subsuperficial (SFS) (Sánchez, 2009).

1. El humedal FWS (Figura 2), permite que el agua fluya sobre el terreno, expuesta a la atmósfera y al sol directo. El canal o represa es recubierto con una barrera impermeable (arcilla o geotextil) cubierta con piedras, grava y tierra y se planta vegetación de la región (p.ej. cola de zorro y/o juncos). El humedal es inundado con aguas residuales hasta una profundidad de 10 a 45 cm por encima del nivel del terreno. Al fluir suavemente por el humedal, el agua residual pasa por procesos físicos, químicos y biológicos simultáneos; se filtran los sólidos, se degrada la materia orgánica y se eliminan los nutrientes. Las aguas residuales pueden ingresar en el humedal usando represas o perforando hoyos en un tubo de distribución para permitirle entrar en intervalos regulares, (Sánchez, 2009).

2. Humedal SFS (Figura 3), permite que el agua circule a través del sustrato. En la mayoría de los casos se usan para el tratamiento de aguas residuales generadas en núcleos de población de menos de 2000 habitantes. El medio granular es el principal elemento de un humedal de flujo subsuperficial que lo diferencia del humedal de flujo libre. Este tipo de humedal a su vez puede ser vertical u horizontal: En el primero el agua circula verticalmente a través del sustrato de manera intermitente, se disponen tres capas horizontales con distinta granulometría, la cual aumenta con la profundidad del lecho. Esta disposición se adopta para que el paso del agua por el lecho no sea excesivamente rápido o lento (Sánchez, 2009; Delgadillo 2010).

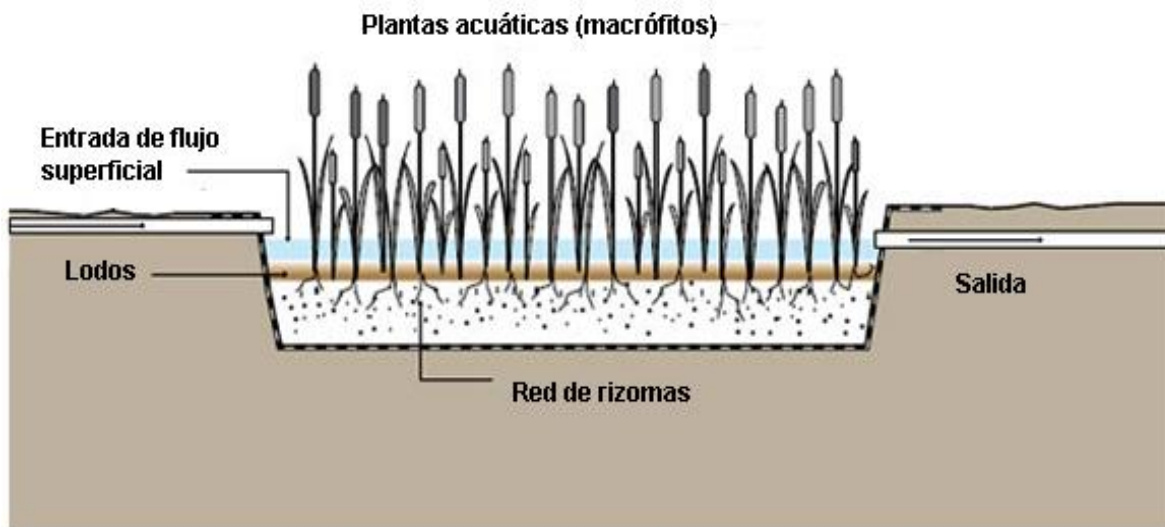


Figura 2. Humedal construido de flujo libre (FWS) (adaptado de Sánchez, 2009).

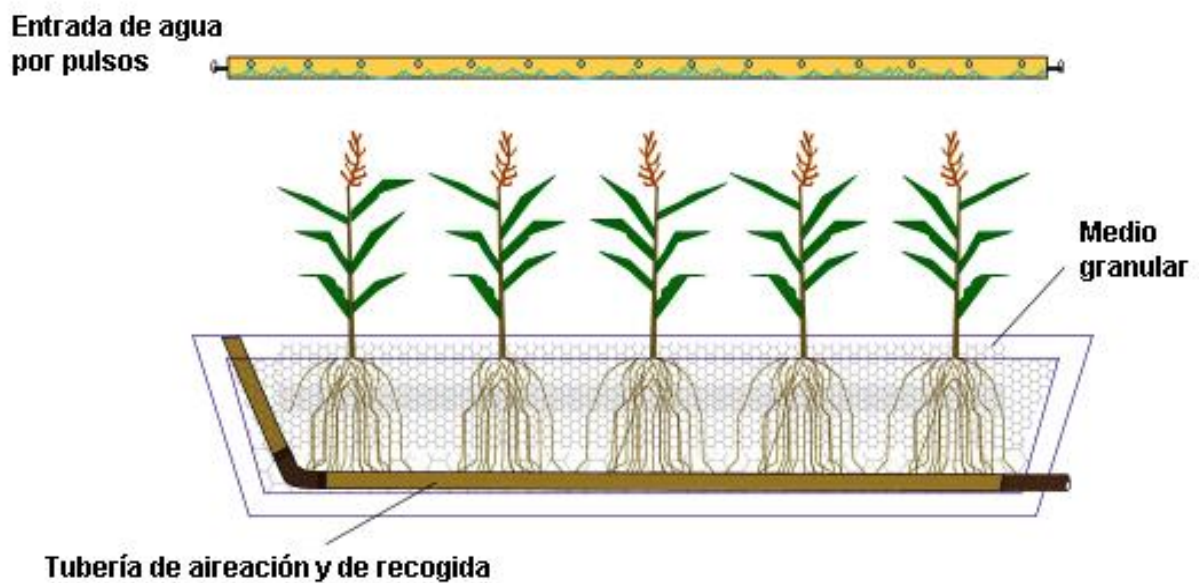


Figura 3. Humedales construidos de flujo subsuperficial vertical (SFS) (adaptado de Sánchez, 2009).

En el segundo SFS-horizontal (Figura 4) el agua circula horizontalmente a través del sustrato de manera continua. Se favorecen las condiciones anaerobias al mantenerse el nivel del agua por debajo del sustrato. Se suelen desarrollar procesos de desnitrificación.

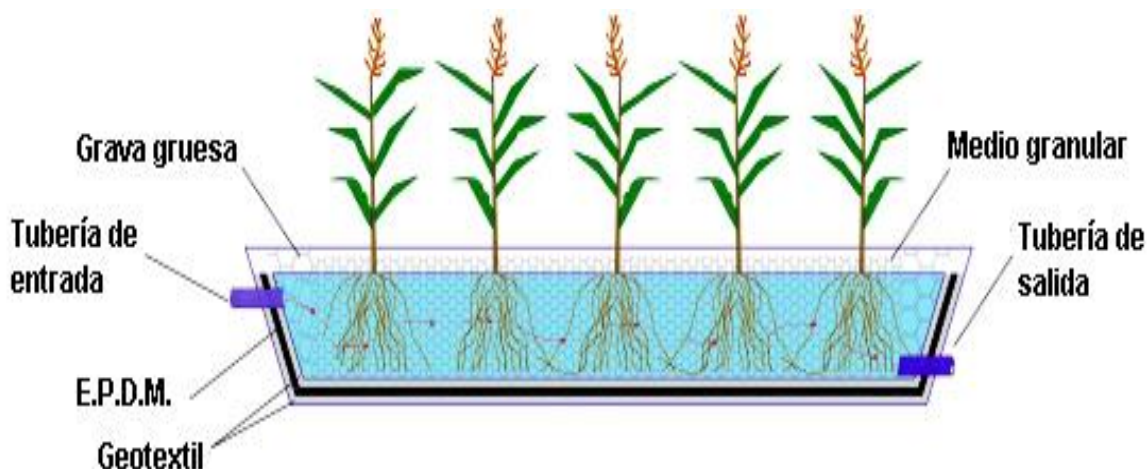


Figura 4. Humedales construidos de flujo subsuperficial horizontal (Adaptado de Sánchez, 2009).

Las plantas más utilizadas en los humedales para el tratamiento de agua se muestran en el cuadro 2. Mientras que algunas ventajas y desventajas del uso de humedales construidos se muestran en el cuadro 3.

Cuadro 2. Características y usos de especies de plantas que son utilizadas en humedales.

Especies de plantas		Características	Utilidad
Nombre científico	Nombre común		
<i>Typha spp.</i>	Aneas	Son fuertes, fácil de propagar, y capaz de producir una biomasa anual grande.	Eliminan nitrato y fosfato.
<i>Schoenoplectus spp.</i> , <i>Scirpus spp.</i>	Junco	Crecen en grupos y en agua que tiene una profundidad de 5cm a 3m.	Eliminan contaminantes diversos.
<i>Phragmites australis</i>	Césped de caña	Son plantas altas con raíces profundas, permiten al oxígeno	

		alcanzar la zona de raíz que las dos plantas descritos previamente.	
<i>Iris spp.</i>	Iris	No es una planta de raíces profundas.	Nitrógeno.
<i>Cyperus alternifolius</i>	Palmas flotantes	Gran follaje,	Filtran en gran escala nitratos y fosfatos.
Otras especies			
<i>Scirpus californicus, Canna spp., Hemerocallis fulva, Colacasia esculenta, Iris versicolor, Iris hexagonae, Iris pseudacorus, Scirpus cyperinus y Thalia dealbata.</i>			

Referencia: Delgadillo 2010.

Cuadro 3. Ventajas y desventajas del uso de humedales construidos

Ventajas	Desventajas
Bajos costos de operación.	Los costos de construcción necesitan de un capital medio a alto.
Bajo consumo de materiales e insumo de energía.	Para su construcción necesitan extensos terrenos.
Toleran una amplia gama de contaminantes.	Acumulación de sustancias tóxicas en el suelo y sedimentos.
Método natural y sostenible para el tratamiento de aguas residuales.	Pueden presentar variaciones en su rendimiento debido a los cambios estacionales.
En ellos se desarrollan una amplia gama de procesos de depuración.	Limitando control operacional sobre los procesos de tratamiento.
Puede ser el hábitat para fauna silvestre.	Si no son bien operados pueden causar problemas a la fauna local y atraer fauna nociva.

Referencia: Osnaya, 2012.

2.6 Mecanismos de acción de los humedales

El mecanismo mediante el cual la planta extrae del agua residual el contaminante es el siguiente: las plantas acuáticas, que constituyen la base de la tecnología de los humedales, tienen la propiedad de inyectar grandes cantidades de oxígeno hacia sus raíces. El aire que no es aprovechado por la especie y que ésta expelle es absorbido por microorganismos, como bacterias y hongos, que se asocian a la raíz y se encargan de metabolizar los contaminantes que entran al sistema (Estrada, 2010).

El principal proceso se lleva a cabo en la rizósfera que está constituida por el volumen de suelo sometido a la influencia de la actividad de las raíces, que puede medir aproximadamente de 1 a 3 mm de espesor. Este volumen de suelo es importante y varía en función de las plantas y el tipo de suelo. Los procesos que ocurren en la zona de las raíces son esenciales para la fitorremediación, ya que la actividad y la biomasa microbiana forman una bioasociación en las raíces, que en el suelo sin raíces. Las raíces liberan sustancias naturales por medio de exudados en el suelo donde crecen (López, 2005). Promueven y mantienen el desarrollo de colonias microbianas, proporcionándoles de un 10-20% del azúcar producido por la actividad fotosintética de la planta. Son liberados muchos compuestos, por ejemplo, hormonas, enzimas, oxígeno y agua. Los microorganismos rizosféricos, a su vez, promueven el crecimiento de la planta y reducción de los patógenos, por la disposición de nutrientes (López, 2005).

En teoría, cuanto mayor sea la abundancia de raíces (densas y ramificadas), proporcionan un área que permiten mayor desarrollo al contacto de la planta con el suelo, importante para el desarrollo de la microflora y microfauna de la rizósfera (García *et al.*, 2010). Los exudados radiculares promueven la biodegradación de la contaminación orgánica, estimulando la actividad microbiana, convirtiéndolas en moléculas más sencillas, ácidos grasos volátiles y monóxido de carbono, CO₂, por esta mineralización (Núñez *et al.*, 2004).

Las funciones de las plantas acuáticas en humedales se pueden clasificar de acuerdo a sus funciones, como:

a) La Fitoextracción.- los contaminantes son captados por las raíces, y posteriormente éstos son traslocados y/o acumulados hacia los tallos y hojas, (López, 2005).

b) La Fitoacumulación.- el uso de plantas que absorben y concentran en sus partes recolectables (hojas, tallos) los contaminantes contenidos en el suelo (a menudo metales pesados). Se utilizan plantas acumuladoras y / o hiperacumuladoras que sean capaces de tolerar y acumular los metales pesados (Núñez *et al.*, 2004; López, 2005).

c) Fitotransformación o Fitodegradación.- las plantas producen enzimas que catalizan y las sustancias absorbidas, por ellas, y se transforman en menos tóxicas o no tóxicas por la mineralización de los contaminantes en los tejidos vegetales o por los organismos de la rizósfera alimentados por la planta (Núñez *et al.*, 2004; López, 2005).

d) Fitofiltración o rizofiltración.- utilizados para la descontaminación y restauración de las aguas superficiales y subterráneas. Los contaminantes son absorbidos por las raíces de las plantas en ambientes húmedos, (Núñez *et al.*, 2004, López, 2005).

e) Fitovolatilización.- las plantas absorben el agua de la litosfera que contiene los contaminantes y otras toxinas orgánicas, transformándolos en elementos volátiles, y que luego liberan a la atmósfera a través de sus hojas, una vez que los contaminantes son degradados en componentes menos contaminantes, (Núñez *et.al.*, 2004, López, 2005).

f) Fitoestabilización.- reduce la movilidad de los contaminantes. La técnica más utilizada es el uso de plantas para reducir la escorrentía superficial y subsuperficial, lo que limita la erosión y reduce la escorrentía hacia el acuífero subterráneo, (Núñez *et al.*, 2004; López, 2005).

g) Fitorrestauración.- Esta técnica consiste en la completa restauración de suelos contaminados a un estado cercano al funcionamiento de un suelo natural.

Entre los beneficios con el tratamiento de los humedales es la existencia de interfaces aeróbicas/anaeróbicas en la superficie de la tierra asociada con la rizósfera de la planta. La proximidad de los volúmenes del suelo aeróbico y anaerobio proporcionan una oportunidad de reducir concentraciones de compuestos fármacos. El potencial también existe para la fotodegradación de compuestos activos farmacéuticamente en la superficie del flujo del humedal. Varios estudios han documentado la fotodegradación de varios fármacos en las aguas de la superficie, incluso el diclofenaco, naproxeno y ketoprofeno. El tratamiento con humedales son sistemas generalmente poco profundos que reducen la atenuación de luz y aumentan al máximo la fotólisis, la cual se duplica con agua saturada de oxígeno y nitrógeno, para los casos de naproxeno así como propanolol (López, 2005).

El número, concentración, y la complejidad química de varios compuestos farmacéuticamente activos en el flujo del arroyo varían ampliamente. Esta complejidad, es probable que la mezcla de farmacéuticos impida a una sola tecnología en el tratamiento ser suficiente y eliminar a todos los compuestos. Considerando siempre, que los componentes de la biota del suelo, normalmente son los siguientes: bacterias, hongos, fauna, entre otros y virus solo en tejidos, cumplen diferentes funciones, en general: formación del suelo, crecimiento vegetal, ciclo del carbono; en una asociación simbiótica natural (López, 2005).

2.7 Descripción de las especies utilizadas

2.7.1. Familia *Cyperaceae*

Hierbas anuales o perennes, glabras o pelosas. Tallos erectos o ascendentes, frecuentemente trígonos, usualmente sólidos. Hojas generalmente 3-seriadas; láminas lineares o filiformes a elípticas, a veces reducidas o ausentes; vainas generalmente cerradas, no auriculadas, ocasionalmente con una contralígula lingulada opuesta a la lámina. Flores pequeñas, bisexuales o unisexuales y las plantas monoicas o raramente dioicas, laterales o terminales y laterales, por lo menos las laterales generalmente con una escama floral (conocida como gluma)

subyacente, dispuestas dística o espiraladamente en el eje (raquilla) de una inflorescencia parcial (espiguilla); espiguillas a veces con escamas florales (conocidas como bractéolas) subyacentes y dispuestas en espigas, a veces diversamente reducidas. Perianto representado por escamas hipóginas, un hipoginio cupuliforme, cerdas o pelos, o ausente. Estambres generalmente 1-3, las anteras introrsas o latrorsas. Estilo 1, generalmente con 2 o 3 estigmas. Ovario súpero, de 2 o 3 carpelos fusionados formando un lóculo único con un óvulo basal. Fruto un aquenio, lenticular, trígono o subgloboso, desnudo o más o menos envuelto en una escama floral modificada (utrículo), en una raquilla modificada o en un hipoginio derivado del perianto. Cosmopolita. Para efectos de la siguiente clave artificial, las unidades estrobiliformes de la inflorescencia son referidas en general como espiguillas, sean simples o compuestas. También todos sus componentes escuamiformes son referidos como escamas florales, sean bractéolas o glumas (Adams, 2010).

La familia Cyperaceae está representada en el mundo por 115 géneros y 3600 especies. Para México están registrados 20 géneros y 404 especies, (Ludlow y Diego, 2002).

2.7.1.1. Género *Cyperus* L.

Perennes o anuales pequeñas a grandes, con o sin rizomas, raramente estoloníferas. Tallos usualmente cespitosos, trígonos o menos frecuentemente teretes. Hojas envainando al tallo en la base, algunas veces sin láminas, generalmente escabriúsculas con setulas antrorsas en los márgenes y la costilla media en el envés. Inflorescencia determinada, desde una cabezuela simple sésil hasta una panícula decompuesta umbeliforme; brácteas foliiformes en el extremo superior del tallo escapífero. Espiguillas bisexuales (unisexuales en *C. canus*) comprimidas o subteretes, en espigas o digitadas en los extremos de los rayos o rayuelos, pauci- o multifloras. Glumas dísticas, alternando en una raquilla recta o flexuosa, alada o no alada, 3- o más nervias, 1- o 2-carinadas, persistentes o caducas; raquilla persistente o decidua distal a un profilo adaxial y una bractéola

abaxial. Flores bisexuales (excepto en la dioica *C. canus*); perianto ausente; estambres 1-3; estigmas 3 (2 en *C. laevigatus*). Aquenios trígonos o más o menos comprimidos dorsiventralmente, raramente subteretes, a menudo apiculados pero no rostrados, la superficie usualmente punticulada, a veces lisa, raramente granular. Aprox. 550 spp. Cosmopolita (Adams, 2010).

2.7.1.2 *Cyperus* L.

Es una planta del género *Cyperus*, de la familia de las ciperáceas. Alternativamente es conocida como paragueta, papiro o navajuelas, es una planta perenne creciendo en masas sobre suelos pantanosos; Rizomas leñosos y gruesos, con numerosas raíces adventicias, culmos (tallo principal de la planta) próximos entre sí, de 1m hasta 5 m de alto, la base engrosada de sección cilíndrica cubierta con vainas sin láminas, coriáceas, de pardas a marrón rojizas; el culmo alargado y cilíndrico se va tornando trígono hacia el ápice con ángulos obtusos o redondeados; inflorescencia una gran umbela de radios inflorescenciales, terminal esferoidal de hasta 70 cm de diámetro, base con bractéolas escariosas envainadoras pardo rojizo, pedúnculos verde oscuro a veces surcados rematando en fascículos de espiguillas cilíndricas de 1-2 cm de largo y 0.6 –1 mm ancho pardo rojizo con 6 a 12 flores protegidas por su correspondiente gluma, fruto una pequeña nuez (Adams, 2010).

2.7.1.2.1. Hábitat y ecología

Forman el hábitat natural de muchas especies de animales silvestres, especialmente de las aves, a las cuales les proporcionan refugio y alimentación (Ludlow y Diego, 2002).

Es un elemento importante en la vegetación acuática y subacuática y en algunos cuerpos de agua poco contaminados es dominante. También junto con las *Poaceae* forman parte del sotobosque en los bosques de *Quercus* y *Pinus*, son muy abundantes en los potreros y zonas perturbadas, en los alrededores de las habitaciones humanas, orillas de camino, basureros, terrenos baldíos y aún en los drenes de petróleo, como *Cyperus odoratus* (Ludlow y Diego, 2002).

2.7.1.2.2 Distribución

Originaria de Asia menor y África tropical, se ha cultivado en los jardines acuáticos de las regiones tropicales del mundo. Creciendo abundantemente en cuerpos de agua y zonas pantanosas (Ludlow y Diego, 2002).

2.7.1.2.3 Aprovechamiento

Útil en la elaboración de papel; el "papiro" fue uno de los primeros materiales de origen vegetal sobre los cuales podía escribirse. Hace más de 5 500 años, los Egipcios ya utilizaban la médula de los tallos de *Cyperus papyrus* L, Alimentación, forrajera, medicinal y de valor afrodisíaco es útil como antidisentérico, antihemético, para combatir la fiebre amarilla, dolores de pecho, tónico y auxiliar del útero, es utilizada toda la planta (Ludlow y Diego, 2002).

De algunas especies de Cyperaceae, se extrae la materia prima para la elaboración de cuerdas, cestos, cajas de trabajo, cubiertas de muebles, etc. Las hojas de *Cladium jamaicense* Crantz o "cortadera", se utilizan para techar casas y en la elaboración de sillas de montar, tapetes (Ludlow y Diego, 2002). *Cyperus schweinitzii* posee rizomas con olor agradable, del cual se ha aislado ciperotundona, importante fuente de terpenos, muy usados en la industria de los perfumes (Ludlow y Diego 2002).

Algunas especies se cultivan en jardines acuáticos como plantas decorativas; las más frecuentes son: *Cyperus papyrus* L., *Cyperus involucratus* Rottb. y *Eleocharis elegans*. En el lago de Cuitzeo, México, especies de *Scirpus* y *Cyperus*, se utilizan con fines ornamentales (Ludlow y Diego, 2002).

2.7.2. Familia Typhaceae

Plantas herbáceas, palustres, rizomatosas, 1-3 m de altura. Tallos erguidos, cilíndricos. Hojas ensiformes, con vainas que se continúan en aurículas membranáceas con distinto grado de desarrollo; haz plano, envés de convexidad

variable. Flores monoicas en espádice atípico con 2 hileras de brácteas foliáceas, dísticas, tempranamente caducas (espatas) dispuestas a lo largo del eje, 1 en la parte basal pistilada, cilíndrica y hasta 3 ó 4 en el sector estaminado, apical, levemente cónico; los sectores florales aludidos pueden estar o no separados por un segmento desnudo de raquis fibroso y flexible, de longitud variable. Flores estaminadas con 1-5 (9) estambres; filamentos soldados total o parcialmente y unidos por su base a escamas periánticas filiformes o comprimidas, simples o ramificadas, de formas muy variables; anteras oblongas, basifijas, con dehiscencia longitudinal, conectivo prolongado en un ápice obtuso, o apiculado, o subulado; polen simple o en tétrades (Bonilla-Barbosa y Santamaría-Araúz, 2012).

Flores pistiladas insertas en raquis secundarios; las fértiles ebracteoladas o con 1 bráctea tectriz; ovario fusiforme, unicarpelar, unilocular, uniovulado y sobre un ginopodio de longitud variable donde se insertan, en 1 a 4 verticilos, sedosos tricomas periánticos filiformes, así como la bráctea aludida, más larga que éstos y espátulo-apiculada en el ápice o simplemente ensanchada y apiculada; estilo filiforme; estigma asimétrico, desde filiforme a oblongo, con borde levemente fimbriado; óvulo anátropo. Entre estas flores fértiles se ubican otras estériles, solitarias o no, cada una con un pistilodio terminado en un breve mucrón y acompañado de tricomas periánticos, como los descritos para las flores fértiles. Fruto seco, fusiforme, con largo estipe cubierto de tricomas filiformes; estilo persistente; pericarpo con episperma coriáceo; endosperma farináceo. Se las distingue con el nombre vulgar: “totora”; ocasionalmente pueden aparecer híbridos interespecíficos (Bonilla y Santamaría, 2012).

2.7.2.1 Género *Typha* L.

Plantas acuáticas, perennes o en condiciones desfavorables anuales; vainas de las hojas con su parte superior atenuada hacia la lámina o auriculadas, simétricas o asimétricas, verdes a incoloras, con la epidermis de la superficie ventral con glándulas mucilaginosas incoloras o de color pardo oscuro, láminas planas o planoconvexas en el envés, ápice obtuso a agudo; inflorescencias con flores densamente agrupadas, flores con una o más brácteas foliáceas caducas, lineares o linear-

lanceoladas a cuneadas; flores masculinas con numerosas bractéolas simples o ramificadas; estambres 1 a 7, filamentos libres o connados, anteras lineares a oblongas, ápice del conectivo obtuso, apiculado o subulado; flores femeninas con o sin bractéolas filiformes, con el ápice ensanchado, acuminado o redondeado, ovario espatulado o romboide-fusiforame, estilo generalmente filiforme o rudimentario en las flores estériles, erecto, estigma espatulado o rómbico-fusiforame, o rudimentario en las flores estériles, de color blanco o verde pero pardo cuando está seco; fruto en forma de cápsula fusiforme a elipsoide, subsésil o largamente estipitado; semilla solitaria, subcilíndrica a fusiforme, endosperma carnosu o farináceo. Género cosmopolita con 8 a 13 especies que habitan generalmente en agua dulce y algunas veces en la salobre (Bonilla y Santamaría, 2012).

El género es importante económicamente, ya que con las hojas se elaboran gran variedad de artesanías, artículos para el hogar, para la construcción de techos y con las inflorescencias arreglos florales, y al mezclarlas con lodo se construyen tlacuiles y pretilos en cocinas rurales, además se emplean como forraje. Desde el punto de vista ecológico, se emplean para la purificación de aguas contaminadas (filtros bioquímicos) en humedales naturales y artificiales. También se les ha considerado en algunas partes del mundo como plagas o malezas acuáticas por cubrir grandes extensiones de terrenos y obstaculizar el riego, la pesca y la navegación (Bonilla y Santamaría, 2012).

2.7.2.2 *Typha angustifolia* L.

Planta herbácea, acuática, enraizada, emergente, perenne o en condiciones desfavorables anual, de 2.3 a 3.2 m de alto; hojas 8 o más, generalmente igualando o excediendo la altura de las espigas, vainas atenuadas en el ápice hacia la lámina, por lo común asimétricas, pero algunas veces simétricas, epidermis de la superficie ventral con gran cantidad de glándulas mucilaginosas de color pardo oscuro, dispuestas en líneas longitudinales y extendiéndose hacia la base de la lámina, ésta angostamente linear, de 1.8 a 3.8 m de largo y 0.9 a 1.5 cm de ancho, envés ligeramente convexo cerca de la vaina y plano hacia el ápice, que es agudo;

inflorescencias de color pardo claro, con una o más brácteas foliáceas caducas; espigas masculinas de 28 a 39 cm de largo y de 1.3 a 2.4 cm de ancho, en general separadas de las femeninas por 1.5 a 4.1 cm, bractéolas de las flores masculinas filiformes a espatuladas, simples a ramificadas, algunas veces fimbriadas, frecuentemente coloreadas por puntos pardos oscuros en el ápice, de 2.1 a 2.8 mm de largo, estambres 2 a 4, total o parcialmente soldados en la base, filamentos de 0.9 a 2.2 mm de largo, anteras de 1.8 a 2.7 mm de largo y 0.1 a 0.2 mm de ancho, conectivo generalmente obtuso y algunas veces apiculado; espigas femeninas de 32 a 41 cm de largo y 1.4 a 1.9 cm de diámetro, bractéolas de sus flores filiformes, acuminadas en el ápice, más largas que los pelos del ginóforo, de color pardo claro en el ápice, de 3 a 5 mm de largo, pelos del ginóforo simples, ligeramente coloreados de color pardo en el ápice, más cortos que los estigmas, pedicelos de 1.2 a 1.6 mm de largo, ovario fusiforme, estilo de 1 a 2 mm de largo, estigma linear a filiforme en el ápice, de 0.5 a 1.5 mm de largo, de color pardo claro; fruto fusiforme, de 1 a 1.5 mm de largo. Planta propia de ambientes lénticos de agua dulce como lagos, presas, pantanos, zonas inundadas, y de ambientes lóticos como manantiales, zanjas y canales, colectada en el norte y sur de Guanajuato, sur y suroeste de Querétaro, así como en el norte de Michoacán. Altura 1100-2100 m. Florece y fructifica durante todo el año (Bonilla y Santamaría, 2013). Es conocida como pasto salchicha o cuete.

2.7.2.21 Hábitat y ecología

Tiene preferencias en estanques y corrientes hídricas continuas y presenta características generales son como se indica a continuación: Hierba acuática perenne, rizomatosa y muy robusta. Las hojas son muy largas y lineales, las inflorescencias son cilíndricas, muy densamente dispuestas y separadas las flores masculinas y femeninas, éstas están sostenidas por un largo tallo central. Se diferencia de *T. latifolia* por la anchura de las hojas y porque esta última tiene las inflorescencias femeninas y masculinas prácticamente contiguas mientras que en *T. angustifolia* están separadas por un espacio desnudo de hasta 12 cm. La época de floración es de Mayo a Agosto (Curt, 2013).

2.7.2.2.2 Distribución

Esta planta acuática, se encuentra en el Hemisferio Norte en lugares pantanosos. En Norteamérica, es una planta introducida. También se encuentra en algunos humedales de Perú y Chile. Se considera una planta pluriregional (Curt, 2013).

2.7.2.2.3 Aprovechamiento

Ornamental, dentro del acuarismo o en jardines acuáticos, las plantas acuáticas han tenido y siguen teniendo un papel importante debido a que resultan benéficas para el medio acuático y decoran el medio que los rodea, para la elaboración de artesanías, como abono verde ya que las plantas acuáticas son un componente importante como sustrato de almácigos que se emplean para el cultivo del jitomate, aunque esto ha sido solamente a nivel experimental e importantes en la construcción que se utilizan colocándolas para formar techos de chozas o para hacer amarres y unir los postes, además de que también tiene importancia en el hogar, ya que sus hojas maduras son usadas para la elaboración de enseres domésticos, como respaldos y asientos de sillas, el tejido de petates y para la elaboración de abanicos. También, la inflorescencia de esta especie mezclada con lodo sirve para construir el tlecuil o pretil (Bonilla y Santamaría, 2013).

III. ANTECEDENTES

La capacidad biológica de la naturaleza para reciclar los materiales, degradar los tóxicos y depurar el suelo, el aire y el agua es muy grande, pero las diversas actividades antropogénicas, generan amplia variedad y cantidad de contaminantes que sobrepasa esta capacidad de autodepuración natural, del Ambiente (Barceló y López, 2011). Actualmente a los contaminantes orgánicos vertidos al agua se le suman cantidades importantes de contaminantes, clasificados recientemente como Contaminantes Emergentes (CE en México) o Productos de higiene personal, fragancias sintéticas utilizadas en productos de limpieza incluyendo fármacos (PPCPs, por sus siglas en inglés), (Gil, 2012) que recientemente se han denominado: Sustancias Farmacológicas Activas, (por sus siglas en inglés, SFAs), son residuos químicos orgánicos e inorgánicos, que posiblemente afecten las diversas formas de vida, generando bioacumulación, toxicidad y provocando una biodegradación compleja para los microorganismos presentes en los medios acuáticos y que para el caso de las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTARs), resulta no benéficas para éstas.

Los cuerpos de agua residual, que no reciben tratamiento adecuado, principalmente y las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTARs), en general emiten gases bióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), y otros, durante su proceso, al medio ambiente (Barceló *et al.*, 2008), sí no se cuenta con vegetación amortiguadora en su entorno contribuye a la generación de gases de efecto invernadero, GEI que se emiten a la atmósfera. Considerando las actividades agrícolas, consecuentemente la: deforestación, erosión, disminución de la biodiversidad en los ecosistemas, que también aportan condiciones adversas al Medio Ambiente, generando un pronóstico reservado, en virtud que estas masas acumuladas de gases GEI, no permiten los intercambios naturales de temperatura, con la atmosfera, lo que implica una acumulación de calor en la superficie del planeta (Semarnat, 2009), posiblemente sean aportaciones a las condiciones que generan el cambio climático.

3.1 En México.

Los Residuos Peligrosos Domésticos, RPD, que varía del 0.01 al 1% del total de los residuos sólidos, RS, municipales, incluyen los fármacos caducos y otros, dispuestos en los residuos sólidos, que finalmente tienen participación en la contaminación de cuerpos de agua, a través del lixiviado que éstos generan (Domínguez *et al.*, 2010).

Otros estudios, indican que por la disposición inadecuada de fármacos caducos o en demasía, ocasionan que éstos entren al medio ambiente en forma indiscriminada, (Ayala *et al.*, 2010), llegan a incorporarse a cuerpos de agua residual. Los compuestos farmacéuticos se están difundiendo en el ambiente acuático a través de las descargas de aguas residuales, alrededor del mundo (Santos, 2006; White *et al.*, 2006).

En México además de lo que ocurre en EU, Alemania, Austria, entre otros países, se suma una problemática más, debido a que los medicamentos al no ser dispuestos de manera segura, han entrado al mercado informal donde son comercializados en condiciones que los hace inseguros para su ingestión (Ayala *et al.*, 2010).

Los “contaminantes emergentes” (CE), entre los que se encuentran los fármacos y los productos de uso personal, surfactantes, retardantes de fuego, aditivos industriales, esteroides y hormonas, así como los subproductos de la desinfección. Se ha demostrado que estos compuestos se encuentran diseminados en el ambiente y se han detectado en fuentes de abastecimiento de agua, aguas subterráneas e incluso en agua potable. Estos contaminantes corresponden, en la mayoría de los casos, a contaminantes no regulados, que pueden ser candidatos a regulación futura (Becerril, 2009).

La presencia de los CE, es motivo de preocupación, en virtud de que las plantas convencionales de tratamiento de aguas residuales y potables no están diseñadas para eliminar estos CE (García *et al.*, 2011). La eliminación de estos compuestos es limitada en Plantas de Tratamiento de aguas Residuales (White *et al.*, 2006).

A nivel mundial, las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTARs) se han convertido en uno de los retos ecológicos más relevantes y necesario trabajar intensamente en mejorar la tecnología de éstas para el desempeño eficiente, respecto a la eliminación de CE, EPA (Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos) y la OMS (Organización Mundial de la Salud), (Estrada, 2010). Porque de alguna manera la red hídrica tiene conexiones con los cuerpos de agua, (White *et al.*, 2006).

Importante trascendencia tiene el recurso agua en el desarrollo de toda calidad de vida en el planeta que no sería posible sin su presencia, así en esta consideración mundial, se tiene lo siguiente: Los nexos entre pobreza, privación social, integridad ambiental, disponibilidad del agua y salud se distinguen claramente en el Índice de la Pobreza del Agua (IPA). El Índice de la Pobreza del Agua ha sido desarrollado por un grupo de 31 investigadores en consulta con más de 100 profesionales del agua del mundo. A Nivel internacional, clasifica a 147 países según cinco componentes - recursos, acceso, capacidad, uso e impacto ambiental- para mostrar donde existen las mejores y las peores situaciones con respecto a las aguas según el Índice, los 10 países más ricos en agua del mundo son, en orden descendente: Finlandia, Canadá, Islandia, Noruega, Guyana, Surinam, Austria, Irlanda, Suecia y Suiza. Los 10 países últimos en la clasificación del índice de la pobreza del agua están -Haití, Níger, Etiopía, Eritrea, Malawi, Djibouti, Chad, Benin, Ruanda y Burundi. México se encuentra en el lugar 57, Guatemala en el 59 y Argentina ocupa el lugar 60 (Foro Mundial del Agua, 2002).

La disponibilidad de agua potable de buena calidad es un factor importante para preservar la salud humana y son conocidas las enfermedades hídricas, causadas por la contaminación de las aguas, que en el pasado afectaron gravemente la población (Rentería y Pérez, 2000).

Trabajos en otros países, reportan: En España estudios realizados en la Cuenca del Rio Ebro, donde las actividades primordiales son la agricultura, se ha encontrado cantidades importantes de plaguicidas como la atrazina y la simazina presentan cargas promedio anuales de 800 kg de atrazina y 500 de simazina, los mismos cálculos se aplican a los residuos de fármacos como el acetaminofeno (paracetamol), el atenolol (beta-bloqueante), la carbamacepina (utilizada para el control de la epilepsia), el ibuprofeno (anti-inflamatorio), se reporta que de cada uno de estos se derraman después de pasar por PTRs aproximadamente 100 kilogramos en toda la cuenca, que en total se han dado seguimiento a unos 30 fármacos que representan 3,000 kilogramos anuales. En Alemania estas cantidades pueden aumentar (Barceló *et al.*, 2008).

Varios métodos de tratamiento de agua para beber han mostrado algún éxito reduciendo las concentraciones, de estos contaminantes, incluyendo la ozonización, el tratamiento con luz Ultra Violeta, UV, combinado con el peróxido de hidrógeno, filtración con carbón activado granulado, y ósmosis inversa y/o nanofiltración y otros. Sin embargo, mientras estas tecnologías pueden utilizarse ampliamente, para proporcionar un suministro de agua segura para beber al público, la aplicación de algunas de estas es improbable debido al costo de implementación (White *et al.*, 2006).

Como nuevos aportes al conocimiento científico se encuentra el reporte, del tratamiento de la levodopa y el paracetamol mediante el uso del ultrasonido. La evaluación, por primera vez, de la inhibición de los efluentes de la sono-oxidación, (Quesada, 2009).

Entre las tecnologías aplicadas para la remoción de contaminantes, destacan los humedales artificiales, utilizados ampliamente en muchos países, para el tratamiento de efluentes domésticos e industriales (Guillén 2015). Aquí las plantas vegetales, son la base del proceso, ya que degradan, absorben y asimilan en sus tejidos los contaminantes, facilitan el crecimiento bacteriano que a su vez retienen los elementos sólidos en suspensión, (Romero *et al.*, 2009; Estrada, 2010).

Respecto a la aplicación de los humedales para eliminar estos contaminantes, ya algunos autores reportan lo siguiente: Que los humedales tropicales horizontales sub-superficial (HSSF), por sus siglas en inglés, plantados con *Typha angustifolia* para eliminar compuestos farmacéuticos: carbamazepina, ibuprofeno, naproxeno, con un tiempo de residencia relativamente corto de 2 a 4 días, mostraron significativa eficiencia de eliminación en cuanto al ibuprofeno y al naproxeno de 80% a 91%, respectivamente. La carbamazepina, considerado persistente presentó menos eficiencia. La mayor oxidación de la planta, consideran que se encuentra en la rizósfera, que juega un papel muy importante, aunque también la aireación de ésta parece prestar importante desempeño (Qing *et al.*, 2011).

Los Humedales construidos, CWS pueden ofrecer buena eficiencia, en las eliminaciones de productos farmacéuticos comparadas a la eficiencia de las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales, convencionales, PTARs, (Qing *et al.*, 2011).

3.2 Tecnologías para la remoción de contaminantes fármacos

Los tratamientos de PTARs para la remoción de contaminantes en general, se pueden clasificar en tecnologías fisicoquímicas, biológicas, avanzadas y combinadas. A continuación se presenta un resumen de las diferentes tecnologías que operan actualmente. Es conveniente señalar que a la fecha no hay PTARs, específicas para eliminar determinados CE y PPCPs, (White *et al.*, 2006; Gil *et al.*, 2012).

3.3 Tecnologías fisicoquímicas

Las tecnologías fisicoquímicas incluyen la adsorción por carbón activado, procesos de oxidación (ozono y peróxido de hidrógeno), coagulación/ flotación, y cloración. Los procesos por medio de carbón activado y membrana les han demostrado ser los más eficientes (Gil *et al.*, 2012).

En un estudio realizado a nivel laboratorio, utilizando diversos tratamientos (coagulación/flotación, suavización con cal, ozonación, cloración y adsorción con carbón activado granular) se analizó la eliminación de treinta diferentes compuestos farmacéuticos, sin obtener una remoción significativa (<20%) con los procesos de coagulación/ flotación, ni suavización con cal, pero sí un buen resultado con carbón activado granular y oxidación por ozono y cloración (>90%) (Westerhoff *et al.*, 2005). Estos resultados concuerdan con Adams *et al.* (2010), donde compuestos farmacéuticos (carbadox, sulfadimetoxina, trimetoprim) no fueron removidos utilizando coagulantes como sulfato de aluminio y sulfato férrico. De igual manera, en otros estudios, la coagulación resultó ineficiente para la eliminación de diclofenaco, carbamazepina, ibuprofeno y ketoprofeno (Petrovic *et al.*, 2003; Vieno *et al.*, 2006).

Se ha usado el sistema foto-Fenton y sono-Fenton heterogéneos para la eliminación de un conjunto de ocho fármacos de distinta naturaleza, que comúnmente aparecen en los efluentes de depuradora. Estas técnicas consisten en la aplicación combinada de radiación UV-visible o ultrasonidos con H₂O₂ y un catalizador heterogéneo de hierro soportado sobre una sílice mesoporosa tipo SBA-15. La utilización de catalizadores heterogéneos implica una serie de ventajas, entre las que cabe destacar su fácil recuperación por filtración y una menor contaminación del medio de reacción por disolución de hierro. Los ensayos se llevaron a cabo sobre dos matrices acuosas diferentes, disolviendo en ellas una cierta concentración de los fármacos seleccionados (10 mg/L), pudiendo así evaluar la influencia de la matriz en la degradación. Sobre una matriz de agua ultrapura Milli-Q se han realizado un conjunto de experimentos para evaluar la influencia de los diferentes modos de

reacción (H_2O_2 , catalizador y luz o ultrasonidos) sobre la degradación, además de otros ensayos con concentraciones crecientes de peróxido de hidrógeno para evaluar el grado de degradación que experimentan los fármacos estudiados, según la cantidad de este agente oxidante (Manzano, 2008).

En cuanto a los resultados obtenidos tras la experimentación, se observa cómo ambas técnicas de oxidación avanzada presentan una elevada eficacia para degradar los contaminantes estudiados. El sistema Sono-Fenton presenta un bajo aprovechamiento del peróxido de hidrógeno a concentraciones elevadas y una baja efectividad de degradación cuando se redujo la concentración inicial de oxidante, mientras el sistema Foto-Fenton presenta una elevada eficacia para cualquier concentración inicial de oxidante, además de un consumo mayoritario del mismo. Por este motivo, esta técnica parece ser más favorable para este tipo de ensayos (Manzano, 2008).

La concentración óptima de H_2O_2 se considera que es 450 mg/L cuando se aplica Foto-Fenton y 100 mg/L cuando se aplica Sono-Fenton por ello el sistema Foto-Fenton sigue siendo el más efectivo en la degradación de los fármacos. Los resultados arrojaron una relación existente entre el efecto matriz y la degradación en sistemas Foto-Fenton, mientras que en sistemas Sono-Fenton no parece que exista un efecto matriz a considerar. Además, se ha comprobado que sistemas más sencillos de oxidación (como sonicación por ultrasonidos sin catalizador ni H_2O_2) proporcionan una degradación bastante significativa de los contaminantes tratados respecto a los sistemas Sono-Fenton, mientras que para el sistema Foto-Fenton, la eficacia de la degradación es mucho mayor si se aplica esta técnica y no sistemas más sencillos, como la aplicación exclusiva de radiación UV-visible, o combinaciones de radiación UV, catalizador o radiación UV y peróxido de hidrógeno (Manzano, 2008).

3.4 Tecnologías biológicas

Tratamientos convencionales como sistemas de lodos activados o filtros biológicos percoladores pueden rápidamente convertir diversos compuestos orgánicos en biomasa que posteriormente pueden ser separados, por medio de clarificadores. En una planta tratadora de agua residual en Suiza se encontraron compuestos como diclofenaco, naproxeno y carbamazepina, con una eficiencia de remoción de un 69, 45 y 7% respectivamente (Tixier *et al.*, 2003).

Otra tecnología biológica es por humedales, se ha empleado la planta acuática *Typha angustifolia* para eliminar compuestos farmacéuticos: carbamazepina (de 26.7 a 28.4 %; resulta ser uno de los más recalcitrante de los fármacos), ibuprofeno (80%), naproxeno (91%), fenopreno (25%) y ciclofosfamida (82.2%), con un tiempo de residencia de 2 a 4 días; un papel importante de esta planta es la oxidación que se encuentra en la rizósfera y la aireación (Qing *et al.*, 2011).

Los humedales pueden promover la eliminación de los compuestos farmacéuticos a través de varios mecanismos que incluyen: la fotólisis, la absorción de las plantas, la degradación microbiana y la adsorción del suelo. Existen pocos estudios sobre la tasa de extracción/eliminación de fármacos por humedales. Esto ha generado la necesidad de investigar para documentar el grado en que diversos compuestos farmacéuticos se eliminarían en tratamiento a gran escala (White *et al.*, 2006).

3.5 Tecnologías avanzadas

En los últimos años se han estudiado tecnologías como la ósmosis inversa, ultrafiltración, nanofiltración y procesos de oxidación avanzada; estos sistemas son considerados como los más apropiados para remover concentraciones traza de contaminantes fármacos. Por otro lado, se han utilizado Procesos de Oxidación Avanzados (POA) como ozono con peróxido de hidrogeno (O_3/H_2O_2) para tratar ibuprofeno y diclofenaco, donde se logró la eliminación del 90% de estos compuestos (Zwiener *et al.*, 2000).

Los Procesos de Oxidación Avanzada (POA) son tecnologías que se basan en la generación *in situ* de especies transitorias altamente reactivas (H_2O_2 , OH^- , O_2 , O_3), para la mineralización de compuestos orgánicos refractarios y eliminación de agentes patógenos (Chong *et al.*, 2010). Los POA han sido ampliamente estudiados, siendo la fotocatalisis heterogénea con semiconductores como el TiO_2 y la reacción de Fenton (metal de transición más peróxido de hidrógeno) las dos técnicas de mayor aplicación ambiental reportadas en las últimas dos décadas (Patiño *et al.*, 2014)

Usando un reactor a nivel laboratorio se evaluó la eficiencia de un tratamiento con ozono en la degradación de metabolitos nonilfenol etoxilado (NPEO) donde el ácido acético nonilfenol (NPE1C) fue completamente mineralizado, el nonilfenol (NP) en un 80% y en un 50% el nonilfenol etoxilado lipofílico (NP1EO) en 6 minutos de tratamiento en todos los casos (Ike *et al.*, 2002).

Empleando la tecnología de Biorreactor de Membrana (MBR) se evaluó la eliminación de varios fármacos, abarcando un amplio espectro de compuestos farmacéuticos, medicamentos psiquiátricos, antibióticos, macrólidos, antiinflamatorios, otros. La tecnología MBR combina la degradación biológica de los contaminantes con una separación física del agua tratada mediante filtración por membranas incorporada en el mismo biorreactor. Si se acopla el sistema MBR a un sistema de filtración por Ósmosis Rnversa (RO) posterior, se consigue una filtración del efluente, más exhaustiva por el tamaño más pequeño de poro en la RO. La combinación de tratamiento MBR y RO ha permitido eliminar más del 99% de fármacos. Esta elevada eliminación de los contaminantes contrasta con las tecnologías de depuración convencionales utilizadas de una manera más extendida para el tratamiento de aguas residuales urbanas, como es el caso del tratamiento secundario o biológico mediante el sistema de fangos activos, en el que la eliminación de fármacos es incompleta (Liberti, 1999).

El proceso sol-gel convencional basado en la formación de puentes oxo (arreglo molecular) por hidrólisis y policondensación de los precursores moleculares (normalmente silicio o alcóxidos de metales) ha tenido éxito en la preparación y la comprensión de óxido y materiales catalíticos de óxidos mixtos, una ventaja importante de este proceso de sol-gel es su versatilidad, que permite, el control de la composición, morfología, textura, y la estructura de los materiales finales, mediante el ajuste de las velocidades relativas de hidrólisis y reacciones de condensación (Debecker *et al.*, 2013).

3.6 Tecnologías combinadas

Se han reportado diversas investigaciones que contemplan la combinación de procesos de oxidación con procesos biológicos, resaltando su gran potencial ante el problema del tratamiento de aguas contaminadas con PPCPs, o CE; difíciles de eliminar por procesos convencionales, estos pueden ser fisicoquímicos/biológicos y con la ventaja de reutilizar esa agua y contribuir con el cuidado medioambiental (Gogate y Pandit, 2004; Mantzavinos y Psillakis, 2004).

Para el tratamiento de penicilina se ha implementado la ozonación y perozonación ($O_3+H_2O_2$) a diferentes concentraciones, antes de someter un efluente a un tratamiento biológico de lodos activados. El resultado de dicha investigación fue la remoción de 83% de Demanda Química de Oxígeno (DQO) no biodegradable (Arslan *et al.*, 2004). De igual manera se realizó un tratamiento satisfactorio de sustancias estrógenas en un proceso combinado de ozonación y reactor de lecho móvil después de haberse sometido a un tratamiento convencional de lodos activados (Gunnarsson *et al.*, 2009).

Para el tratamiento de un común precursor farmacéutico como es el α -metilfenilglicina se ha utilizado un proceso de foto-Fenton adicionado con H_2O_2 como pre-tratamiento a un Reactor de Biomasa Inmovilizada (IBR) lográndose eliminar hasta 95% del carbono orgánico total (COT) del cual 33% corresponde al sistema de

oxidación avanzada y 62% al tratamiento biológico. En este mismo sistema combinado también se estudió la remoción de ácido nalidíxico (perteneciente al grupo de los Quinolonas), lográndolo remover en sólo 190 minutos (Sirtori *et al.*, 2009).

Finalmente, destacan los humedales artificiales y las plantas vegetales que son la base del proceso ya que degradan, absorben y asimilan en sus tejidos los contaminantes, pero también proporcionan una extensa superficie donde se favorece el crecimiento bacteriano y se retienen los elementos sólidos en suspensión (López *et al.*, 2007). Una combinación de métodos de tratamiento, es recomendable, para aguas residuales con contenido de fármacos (Kavanagh y Keller, 2007). En este trabajo se presentó, la combinación de dos procesos biológicos: un sistema de tratamiento biológico a través de un biodigestor anaerobio para la eliminación de materia orgánica, seguido del sistema humedal para la eliminación de residuos de Sustancias Activas Farmacéuticas, SFAs (por sus siglas en inglés), también así denominadas a los contaminantes emergentes. Refiriéndose al humedal, se propuso el Sub-superficial, por las razones de seguridad en cuanto a la generación de fauna nociva (evitar el crecimiento de los moscos) y la facilidad de que las raíces de las plantas se encuentren inundadas del agua problema. Posteriormente se llevó a cabo una desinfección para ser posible, la disposición final del agua tratada (Estrada, 2010).

IV. OBJETIVOS

4.1 Objetivo general

Demostrar la eliminación de residuos de fármacos (como CE) contenidos en aguas residuales por medio de un Sistema integral anaerobio-humedal construido.

4.2 Objetivos específicos

- Habilitar y acondicionar en la UNACH el Sistema anaerobio-humedal.
- Operar y aplicar mantenimiento al Sistema.
- Verificar y analizar resultados de la tasa de eliminación de los contaminantes fármacos por el Sistema propuesto.

V. HIPÓTESIS

Los residuos de diclofenaco, paracetamol, nitratos y fosfatos, contenidos en las aguas residuales, pueden ser degradados por métodos biológicos pero no totalmente eliminados, mientras que un Sistema integrado anaerobio-humedal eliminaría dichos compuestos.

VI. ÁREA DE ESTUDIO

6.1 Ubicación geográfica

El área de estudio fue en la sección de posgrado de la facultad de Ingeniería Civil-UNACH, lugar localizado bajo las coordenadas de ubicación de acuerdo a la metodología de la Dirección de Catastro Urbano y Rural de Chiapas:

Coordenadas UTM: X= 483406.848848 Y= 1852433.846249;

Coordenadas geográficas: latitud=16° 45' 17.19000" longitud= 93°09'20.46996"

Ubicada dentro de la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. (Ver figura 5).

El municipio de Tuxtla Gutiérrez se ubica entre las coordenadas 16° 45' 11" Norte y 93° 06' 56" Oeste, colinda al Norte con los municipios de San Fernando y Usumacinta, al Sur con el municipio de Suchiapa, al Este con el municipio de Chiapa de Corzo y al Oeste con Ocozocoautla y Berriozábal, a una altura de 540 m.s.n.m (Isidro, 1997). Ocupa una extensión aproximada de 413 Km², esta área representa el 0.5% del territorio del Estado, siendo el municipio con mayor población con 537,102 habitantes.

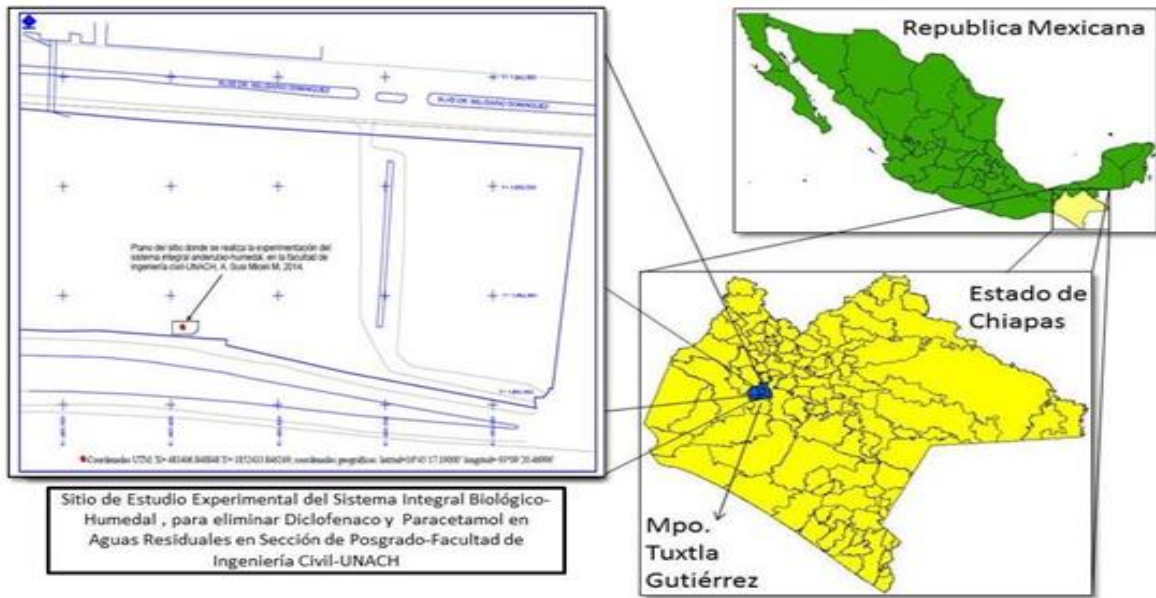


Figura 5. Ubicación del sitio de estudio, sección de posgrado UNACH.

6.2 Situación geográfica

Al norte existe una elevación que se conoce como Cerro de las Animas, este cerro también se desprende del municipio de Berriozábal avanza de Oeste a Este elevándose como rama del macizo central de Chiapas. Correspondiente a la Cordillera del Altiplano Chiapaneco y se interrumpe en la falla geológica de El Cañón del Sumidero. Al Este, el relieve declina hacia el Rio Grijalva como una extensión del Valle Central (Isidro, 1997).

Al Sur se levanta una meseta, que se denomina Meseta de Copoya, con menos elevación en el Oriente y mayor en el Poniente, llegando hasta el Cerro Mactumatzá, en ella se encuentra dos centros de población importantes del municipio, siendo: Copoya y El Jobo (Isidro, 1997).

Hacia el Sur-Oeste, el valle de Tuxtla se prolonga ligeramente hasta perderse en lomeríos y algunas elevaciones del municipio de Ocozocoautla y Berriozábal (Isidro, 1997).

6.3 Hidrología

Tuxtla comparte con Chiapa de Corzo las corrientes del Río Grijalva y al Sur las del Río Suchiapa, pero tanto uno como otro río no son fundamentales para la red hidrológica del municipio. La hidrología municipal se compone de arroyos, entre los cuales el más importante se conoce como Río Sabinal, mismo que nace en Berriozábal, atraviesa el valle central de Tuxtla por la zona urbana hasta desembocar en el Río Grijalva. El Río Sabinal contaba con siete afluentes, la mayoría de ellos en la actualidad se encuentran embovedados, debido al crecimiento de la población, entre los que aún se conservan, se encuentran los siguientes: al Norte el Arroyo de la Chacona y el Poti y al Sur el san Roque (Isidro, 1997).

6.4 Clima

El clima en Tuxtla Gutiérrez, corresponde al tipo Cálido Subhúmedo, con lluvias de verano y bajo porcentaje de lluvia invernal, presentando una temporada corta de menos lluvia (canícula o sequía intraestival) en la mitad del período lluvioso; siendo el menos húmedo de los cálidos subhúmedos, con poca oscilación térmica y el mes más caliente está antes del solsticio de verano; los vientos dominantes provienen del NO. La precipitación total anual es de 984.2 mm y la temperatura media es de 24.7°C, con vientos dominantes del NO (Palacios, 2000).

6.5 Vegetación

El tipo de vegetación en el municipio de Tuxtla Gutiérrez es heterogéneo; como capital del Estado de Chiapas y ciudad cosmopolita ha perdido gran parte de las zonas boscosas por el avance de la zona urbana, originalmente correspondía a selva baja caducifolia y selva mediana (Palacios, 2000), ver cuadro 4.

Cuadro 4. Equivalencias aproximadas entre los tipos de vegetación en Chiapas.

Miranda (1952)	Miranda y Hernández X. (1963) México	RZEDOWSKI (1978) México	BREEDLOVE (1981) Chiapas
Selva alta siempre verde	Selva alta perennifolia	Bosque tropical perennifolio	Tropical Rain forest Lower Montane Rain Forest
Selva alta subdecidua	Selva alta o media Subperennifolia Selva alta o mediana Subcaducifolia	Bosques tropical perennifolio	Evergreen Seasonal Forest
Selva Baja decidua	Selva baja caducifolia	Bosque tropical caducifolio	Tropical deciduous forest
	Selva baja espinosa Caducifolia	Bosque espinoso	Thorn Woodland
Sabana	Sabana Selva baja Subperennifolia	Pastizal (en parte)	Short tree savanna
Palmares	Palmares		Palm forest
Manglar	Manglar	Vegetación acuática y subacuática	Mangrove swamp swamp and lowland riparian forest
	Popal Tulares y carrizales		Herbaceous Marsh
	Vegetación de dunas costeras		Coastal Strand
Selva mediana y baja siempre verde	Selva mediana o baja perennifolia	Bosques de mesófilo de montaña	Montane rain forest Evergreen cloud forest
Bosque deciduo	Bosque caducifolio		Pine-Oak-Liquidambar forest Temperate riparian forest
Bosques de hojas planas y duras	Encinares	Bosques de quercus	Pine-Oak forest
Bosques de hojas aciculares o escamosas	Pinares Bosques de escuamifolios	Bosques de coníferas	
	Bosques de abetos y oyameles		
Zacatonal	Zacatonales	Pastizal (en parte)	Bunch Grassland
Paramo de altura	Vegetación de paramo de altura	Pastizal (en parte)	Evergreen Cloud Scrub
			Second-growth and sucesional forest. And shrub associations
Total de tipos designados: 12	México: 32 Chiapas: 20	México: 10 Chiapas: 9	Total de tipos distinguidos: 19

Referencia: Rzedowski, 2006.

6.6 Flora

Cedro (*Cedrela odorata*), chicozapote (*Manilkara zapote*), guanacaste (*Enterolobium cyclocarpum*), guayabillo (*Psidium sartorianum*), matilisguate (*Tabebuia rosea*), mulato (*Bursera simaruba*), sospó (*Pseudobombax ellipticum*), totoposte (*Licania arborea*), Anona (*Annona reticulata*), brasil (*Haematoxylon brasiletto*), chincuya (*Annona purpurea*), cuaulote (*Guazuma ulmifolia*), caobilla (*Swietenia humilis*), cuchunuc (*Gliricidia sepium*), cupapé (*Cordia dodecandra*), Flor de mayo (*Plumeria rubra*), motmot (*Ceiba aesculifolia*), papausa (*Annona diversifolia*), pumpushuti (*Chochlospermum vitifolium*), quebracho (*Acacia milleriana*) (INEGI, 2010).

6.7 Fauna

Las principales especies encontradas en el municipio tigrillo (*Felis wiedi*), mico de noche (*Potos flavus*), tepezcuintle (*Caniculus paca*), oso hormiguero (*Tamandua mexicana*), mapache (*Procyon lotor*), jabalí (*Sus scrofa*), zorrillo (*Conepatus* sp) venado (*Odocoileus virginianus*, danta (tapir) (*Tapirus bairdii*), iguana (*Iguana iguana*), cantil (*Agkistrodon bilineatus*), chachalaca (*Ortalis veturra*), pájaro carpintero (*Melanerpes erythrocephalus*), gavilán (*Accipiter nisus*), mochuelo rayado (*Athene* sp) y urraca copetona (*Calocitta formosa*) (INEGI, 2010).

6.8 Actividades agropecuarias

En el sector ganadero aporta las siguientes especies: Bovino, ovino, diferentes especies de aves, producción de huevo, leche, miel, en toneladas anuales (Isidro, 2000).

6.9 Recurso agua y su tratamiento

Respecto a plantas de tratamiento de agua residual que se generan en Tuxtla Gutiérrez, actualmente, Marzo 2015, se han instalado dos PTARs: "Paso limón y Tuchtlán que procesan 1120 litros/segundo, mismos que son vertidos al río Sabinal, posterior al tratamiento, (Conagua, 2015).

VII. METODOLOGÍA

El área donde se instaló el sistema humedal fue en la sección de posgrado de la Facultad de Ingeniería Civil-UNACH, donde se realizaron las adecuaciones de la infraestructura de las que se obtuvieron los datos de dimensiones que permiten realizar las estimaciones para conocer los parámetros de trabajo como fueron: volúmenes, longitudes de tubería gastos de los flujos a manejar de entrada y salidas. Para la adquisición de materiales: tuberías, tanques, válvulas de paso y control, bomba, instalación eléctrica, mallas y techos de policarbonato de protección, material de construcción.

A continuación se evaluaron los materiales a utilizar en el sistema: arena, grava de $\frac{3}{4}$ ", suelo fértil, especies de plantas de la región, agua residual sintética, fármacos a trabajar con el sistema y otros. Para posteriormente poner en operación el Sistema Integral biológico-humedal y lograr su consolidación (esto es que las plantas se adapten y crezcan así como se reproduzcan). Buscando la operación estacionaria del sistema o la operación a régimen permanente, verificándolo a través del muestreo determinando los parámetros de control: Demanda Bioquímica de Oxígeno DBO₅, Demanda Química de Oxígeno, DQO, Oxígeno Disuelto, OD, pH y temperatura.

Finalmente una etapa de muestreos de agua para la determinación de DBO₅, DQO, OD, SST, pH y temperatura, seguido de los muestreos de agua para la determinación de diclofenaco y paracetamol; de acuerdo a la normatividad vigente. Se realizaron los mismos análisis en el Laboratorio de CONAGUA en Tuxtla Gutiérrez.

El análisis de los fármacos se realizaron en el laboratorio de la Escuela Nacional de Ciencias Biológicas del Instituto Politécnico Nacional en la ciudad de México, D.F.

Las muestras se tomaron, 5 días consecutivos, cada mes; el muestreo compuesto fue de ocho meses consecutivos, en los puntos siguientes:

Agua residual sintética sin tratar, ARS

Agua a la salida del biodigestor.

Agua a la salida del humedal.

Posteriormente se acidificaron con ácido clorhídrico, HCL 1M hasta un pH de 2, sometiéndose a congelación, en estas condiciones se transportaron al laboratorio de Escuela Nacional de Ciencias Biológicas- IPN, México D.F. Se trasladaron al laboratorio y se refrigeraron para hacer la correspondiente extracción de la muestra conforme a la técnica de análisis desarrollada para estos fármacos: diclofenaco y paracetamol; previamente se corrieron muestras para verificación de la curvas que describen las muestras patrón de diclofenaco y paracetamol por separado (Figura 24 25).

7.1 Habilitación y acondicionamiento del Sistema Integral anaerobio-humedal

7.1.1 Cálculos de trabajo para el diseño y construcción del Sistema Integral anaerobio-humedal

El sitio se encontraba en suelo franco donde se habilitaron los tanques de cemento ya contruidos; conforman los tanque dosificador al biodigestor y biodigestor, se construyó: el piso de las áreas de tanques y enmallado de protección al humedal, se instaló el tinaco Rotoplas[®] de alimentación, se aplicó un acabado, en superficie interior, para sellar el tanque-biodigestor que, se construyó el tanque receptor de agua tratada, al final; así como el sistema de tuberías de conducción del afluente y efluente del sistema anaerobio-humedal. Se considera, para esto los criterios de Ramalho, (2003).

El tanque Rotoplas® de alimentación es de 450 litros. El tanque–biodigestor real es de 275 litros; con un empaque polimérico con superficie de contacto de 2.673 m² equivalente a 40.01 litros, en la parte central del biodigestor en el que:

Se midió el material a colocar, con las siguientes medidas: Largo= 2.43 m, Ancho= 0.55 m y Espesor=0.000108 m; obteniendo una superficie de trabajo de 2.673 m²:

$$\text{Superficie de trabajo} = 1.3365 \text{ m}^2 \times 2 \text{ caras} = 2.673 \text{ m}^2$$

De acuerdo a las medidas de los trozos se tiene que cada uno tiene: 0.0072 m²; para saber cuántos trazos fueron, se realizaron las siguientes operaciones:

$$\text{No. Trazos de empaque} = \frac{2.673 \text{ m}^2}{0.0072 \text{ m}^2} = 371.25 \text{ trazos}$$

$$\begin{aligned} \text{Volumen de Trazos} &= 371.25 \text{ trazos} \times 0.000108 \text{ m}^3 \text{ trazos} \\ \text{Empaque} &= 0.040095 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

Volumen del reactor anaeróbico:

$$\begin{aligned} \text{Volumen del Reactor:} & & \text{Vol. empaque} &= 0.20 \text{ m} \times 0.50 \text{ m} \times 1.05 \text{ m} \\ \text{Profundidad} &= 0.60 \text{ m} & \text{Vol. emp.} &= 0.040095 \text{ m}^3 \\ \text{Ancho} &= 0.50 \text{ m} & & \\ \text{Largo} &= 1.05 \text{ m} & & \end{aligned}$$

$$V_T = (0.60 \text{ m}) (0.50 \text{ m}) (1.05 \text{ m}) = 0.315 \text{ m}^3$$

$$\begin{aligned} V_{\text{Real de Trabajo Biodigestor}} &= V_{\text{total biodigestor}} - V_{\text{empaque}} = 0.315 \text{ m}^3 - 0.040095 \text{ m}^3 \\ V_{R.T.} &= 0.2749 \text{ m}^3 = 275 \text{ litros, volumen real de trabajo del biodigestor.} \end{aligned}$$

La Temperatura promedio de trabajo = 28.23 °C ± 2.86

Para la determinación de la concentración en mg/L de fármacos se puede aplicar la ecuación 1.

En el proceso de la degradación de los fármacos, donde se tiene una tasa de reducción en la concentración del mismo, y que es posible ser detectada analíticamente puede ser modelada con la ecuación general (Durruty, 2013).

$$\frac{C_e}{C_i} = e^{-Kt} \quad \text{Ecuación 1}$$

Dónde: C_i = Concentración de fármaco, al inicio del tiempo t , mg/L de fármaco.

C_e = Concentración remanente del Fármaco después de un tiempo t , mg/L de fármaco.

K_t = Constante de degradación de primer orden a temperatura °C, días⁻¹

T = Tiempo de residencia hidráulico, días.

Para el Humedal:

Está conformada por las siguientes dimensiones:

Ancho = 2.34 m

Largo = 2.83 m

Profundidad = 0.55 con un desnivel 1% cada uno.

V de trabajo = 2.34m X 2.83m X 0.55m

– 22 % de muros = 0.8012 m³

$V_{\text{Real de trabajo del humedal}} = 2.8402 \text{ m}^3$

En los humedales, según Sánchez, (2009) el flujo está gobernado por:

La Ley de Darcy expresada de esta forma: $q = -K \left[\frac{dh}{dl} \right]$

Dónde: $q = Q/\text{sección}$ (es decir: caudal que circula por m² de sección)

K = Conductividad Hidráulica (mejor que “permeabilidad”)

dh/dl = gradiente hidráulico expresado en incrementos infinitesimales (el signo menos se debe a que el caudal es una magnitud vectorial, cuya dirección es hacia los Δh decrecientes; es decir, que Δh o dh es negativo y, por tanto, el caudal será positivo).

La ecuación que corresponde al humedal subsuperficial de acuerdo a Kadlec and knight, 1996:

$$\ln \left(\frac{C_e - C^*}{C_i - C^*} \right) = - \frac{K_{AT}}{q} \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde:

Ce = Concentración de salida del fármaco en, mg/L

Ci = Concentración de entrada del fármaco en, mg/ L

C* = Concentración base del fármaco en, mg/L

K_{AT}=Temperatura a velocidad constante areal de primer orden dependientes de la Temperatura., m/año (coeficiente areal)

q = Tasa de carga hidráulica, m/año.

Para la visualización de los resultados realizados con los análisis realizados en este estudio, véase el apartado de resultados.

7.2 Desarrollo del proyecto

El área de estudio se encuentra en la Sección de Posgrado de la Facultad de Ingeniería Civil de la UNACH. Para cumplir con los objetivos en la habilitación y acondicionamiento del Sistema anaerobio-humedal para la eliminación de los fármacos; diclofenaco y paracetamol por medio del sistema, contenidos en Agua Residual Sintética ARS, donde se encontraba una instalación a suelo franco, se procedió a habilitar, adecuar las instalaciones que ya se encontraban con el tanque alimentador al biodigestor a este último se instaló el empaque polimérico en su

interior y se selló con tapa de cemento, quedando únicamente con la entrada en la parte inferior, de agua ARS a tratar y la respectiva salida en parte superior del extremo opuesto; que su vez alimentara al humedal.

Los materiales utilizados en el humedal fueron: grava $\frac{3}{4}$ ", arena, suelo fértil; se determinó la propiedad física de porosidad de la grava, por ser el material en mayor volumen ocupa en el humedal, como se describe a continuación.

7.3 Determinación de porosidad de la grava (sustrato)

Respecto al sustrato que es la grava de $\frac{3}{4}$ " a la que se le determinó la porosidad de acuerdo, la ley de desplazamiento (Ley de Arquímedes) según Hewitt (2009), de líquido en este caso agua corriente, el principio de Arquímedes indica que "todo cuerpo sumergido dentro de un fluido experimenta una fuerza ascendente llamada empuje, equivalente al peso del fluido desalojado por el cuerpo".

La técnica que se aplicó para este caso fue la siguiente:

Se aforó un recipiente 20 litros con agua corriente a temperatura ambiente = 33.5 °C y presión atmosférica de 785 mmHg. Posteriormente se fue agregando poco a poco la grava (Figura 6A y B). Se recolectó el agua desplazada, que posteriormente se midió en litros (Figura 6C).

Posteriormente se realizaron los cálculos de acuerdo a:

$$\% \text{ porosidad} = (20 \text{ litros agua} - \text{litros de agua desplazada} / 20 \text{ litros}) \times 100 =$$

En el caso se encontró que el agua desplazada = 10.40 litros

$$\% \text{porosidad} = (20 \text{ litros} - 10.40 \text{ litros} / 20 \text{ litros}) \times 100 = 48\%$$

$$\% \text{ porosidad} = 48\%.$$



Figura 6. A) Agregación de la grava al recipiente lleno de agua. B) Grava en el recipiente lleno de agua. C) Recipientes: lleno de grava y agua (blanco) y recipiente contenedor de agua desalojada (azul).

La adecuación de tratamiento a través del Sistema anaerobio-humedal de trabajo comprende: el tinaco de alimentación al biodigestor a través de un tanque dosificador del biodigestor al humedal y de éste al tanque receptor de agua tratada.

7.4 Trayectoria que sigue el Agua Residual Sintética ARS, tratada por el biodigestor continuada por el humedal

El tinaco tiene un $V= 450$ L, es alimentado con Agua Residual Sintética (ARS), ésta se carga a un tanque suministrador con $V=350$ L, que a su vez alimenta al biodigestor. Posteriormente el ARS tratada, por el biodigestor, pasa al humedal con gasto de 20 litros/día, misma cantidad que se suministraba diaria con la formulación correspondiente, a ésta.

El ARS después de pasar por el biodigestor, con un gasto de 20 litros/día, se continúa al humedal subsuperficial (HFSS); donde se tiene un tiempo de residencia hidráulico (TRH) de 10.33 días, con un gasto de 131.96 litros/día ver figuras 7, 8, 9, 10.

Para la formulación del agua residual sintética ARS, se consideró que las aguas residuales municipales reciben descargas de otras fuentes, que en general pueden ser: domiciliaria, comerciales, sector salud, sector veterinarios, industriales, agroindustriales, pluviales, principalmente; que en sus contenidos se identifican según la DBO_5 y de acuerdo a (Metcalf and Eddy, 1998), los siguientes componentes:

Entre las proteínas comúnmente presentes están las albúminas, globulinas y enzimas resultantes de la misma actividad bacteriana. Los carbohidratos están representados por glucosa, sacarosa, almidón y celulosa, entre otros, y las grasas animales y los aceites provienen de restos de carnes, uso de aceites y otros productos análogos.

El Agua Residual Sintética (ARS) se ha preparado de acuerdo a una formulación que algunos autores sugieren (Rodríguez y Lozano, 2012), en base a lo siguiente:

El estudio de tratamientos de depuración de Aguas Residuales Domésticas (ARD) en reactores prototipo y a nivel de laboratorio, es difícil debido a varias razones como las que se mencionan a continuación:

a) dificultad de transporte de grandes muestras para ser llevadas al laboratorio para alimentar los reactores.

b) demanda importante de tiempo para trasladarse a tomar permanentemente muestras para alimentar dichos reactores.

c) variabilidad en las características fisicoquímicas y bacteriológicas de las ARD crudas.

d) alto riesgo a la salud por la manipulación del ARD con presencia de microorganismos patógenos.

Por estas razones y por un mejor control del agua a tratar, se utilizó una formulación para preparar Agua Residual Sintética (ARS) con una composición conocida de nutrientes.

La composición del sustrato sintético (ARS), en el cuadro 5, propuesto por la Norma alemana DIN 38412 para preparar Agua Residual Sintética, (Rodríguez y Lozano, 2012). De acuerdo a la clasificación en concentración de acuerdo a la DBO_5 contenidos en las aguas residuales en general, se trabajó con contenido de DBO_5 , 180mg/L, de nivel medio (Metcalf and Eddy, 1998). De acuerdo a las concentraciones de diclofenaco se encuentran dentro de los intervalos de: 0.1 μ g/L-28.30mg/L y el paracetamol de 6.0mg/L a 53.0 mg/L, reportadas por distintos autores (Ternes, 1998, Henríquez, 2012) en aguas de salida de PTARs. Con este criterio se agrega a la formulación ARS 2.40 mg/L de diclofenaco y 4.80 mg/L de paracetamol; como concentraciones de trabajo para el Sistema Integral anaerobio-humedal.

Cuadro 5. Formulación del Agua Residual Sintética, ARS.

Componente	Cantidad (mg/L)
Peptona	160
Extracto de carne	110
Urea	30
KH_2PO_4	28
$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	2
$\text{CaCl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$	4
NaCl	7

El inicio del proceso con tinaco Rotoplas[®], en seguida el biodigestor, se continúa al humedal subsuperficial (HFSS); donde se tiene un tiempo de residencia hidráulico (TRH) de 10.33 días, con un gasto de 131.96 L/d.



Figura 7. El tanque alimentador al biodigestor del Sistema Integral anaerobio-humedal.



Figura 8. El Humedal del Sistema Integral anaerobio-humedal donde es tratada el agua de salida del biodigestor.



Figura 9. El humedal y biodigestor del Sistema Integral anaerobio-humedal, a la derecha; que reciben el agua ARS a tratar.



Figura 10. Tanque receptor de aguas tratadas finalmente por el Sistema Integral anaerobio-humedal.

Durante la operación del sistema combinado biodigestor-HFSS, una vez operando a régimen estacionario, por 90 días, los parámetros analizados semanalmente fueron: Oxígeno Disuelto (OD), Demanda Química de Oxígeno (DQO), Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO), estos parámetros se analizaron con forme al APHA, 1998. Los parámetros se midieron en régimen estacionario durante un periodo de ocho semanas, las muestras fueron tomadas en el afluente y efluente del biodigestor y en el efluente del HSFF. Los resultados obtenidos se compararon con la NOM-001-SEMARNAT-1996.

Las especies que se cultivaron en el Sistema de estudio se seleccionaron de acuerdo a las que ya se encuentran en zonas cercanas al sitio de estudio, por estar aclimatadas al medioambiente y por estar en su hábitat en orillas del río.

Las plantas *Typha* se han obtenido de la zona de la Ribera de Cupía, municipio de Chiapa de Corzo, Chiapas; de este sitio se han encontrado la siguiente información que se indica en los cuadros 6 y 7.

Cuadro 6. Características del sitio de colección de las plantas.

Área de colecta	Plantas asociadas	Latitud	Longitud	Altura (msnm)	Temporalidad	
Rivera las fechas	<i>Manguifera indica</i>	16°66'80.56"	93°01'61.11"	400	Lluvias May-Dic	Secas Ene-Abr
Rivera las fechas	<i>Taxodium mucronatum</i> <i>Bursera simaruba</i>					
	<i>Ficus sp</i>					

Cuadro 7. Características socioeconómicas del sitio de colección de plantas.

Población cercana	Actividades	Aprovechamiento	Temperatura anual (°C)		Precipitación anual (mm)	
			Max.	Min.	Max.	Min.
Cabecera mpio. Chiapa de Corzo	Agricultura:	Leña	30	26	1561.5	674.3
Rivera Cupía	maíz calabaza mango Pesquería: tilapia Comercio: restaurante	Alimento				

El humedal se preparó con los siguientes elementos:

- a). El sustrato (material de soporte para el cultivo de la planta vegetal) del humedal es grava de ¾ “, principalmente; se agregó suelo fértil en una proporción del 10% y arena de río.
- b). La vegetación cultivada con las plantas acuáticas que se encuentran en la zona: Nombre común, pasto salchicha, cuete de la *Familia: Typhaceae*. *Nombre científico: Typha angustifolia* y la especie con nombre común papiro, navajuelas de la *Familia: Cyperaceae*, *Nombre científico: Cyperus alternifolius*.

En la figura 11, se muestra el humedal con las plantas cultivadas de *Typhas* y *Cyperaceae* que constituyó el Sistema anaerobio-humedal de tratamiento.

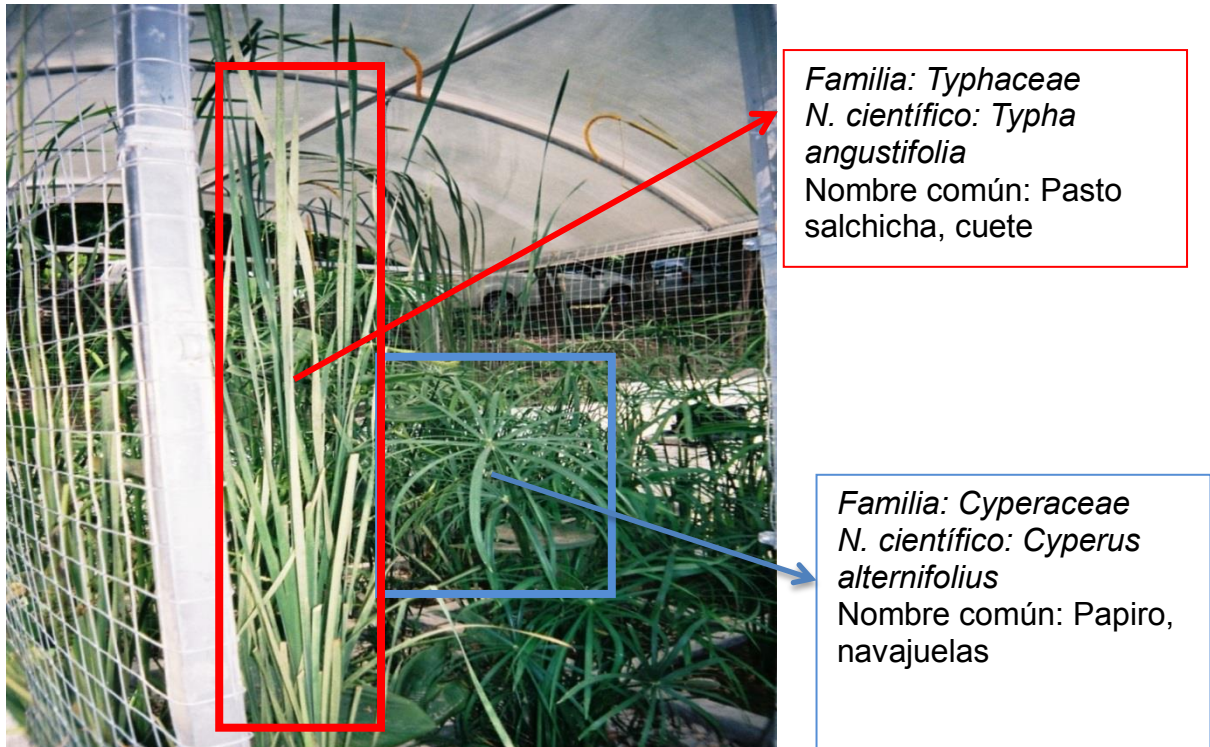


Figura 11. Humedal del Sistema de tratamiento de ARS.

7.5 Registros de parámetros del Sistema Integral anaerobio-humedal experimental durante la operación en el área de trabajo.

Del Sistema se registraron los datos de: temperaturas, pH, del medio ambiente, (expuesta al sol), agua a la salida del biodigestor, agua a la salida del humedal (Cuadro 14 en anexo).

Las temperaturas que presentaron en la operación del Sistema anaerobio-humedal fueron en las correspondiente: a la del medio ambiente (expuesta al sol) con promedio de $35.7^{\circ}\text{C} \pm 5.65$, la de la raíz de la planta con promedio de $27.7^{\circ}\text{C} \pm 4.36$ y la correspondiente a la grava con promedio de $34.5^{\circ}\text{C} \pm 6.20$; promedio de temperaturas del biodigestor $28.23^{\circ}\text{C} \pm 2.86$ la del humedal de $27.77^{\circ}\text{C} \pm 4.36$, (Figura 12).

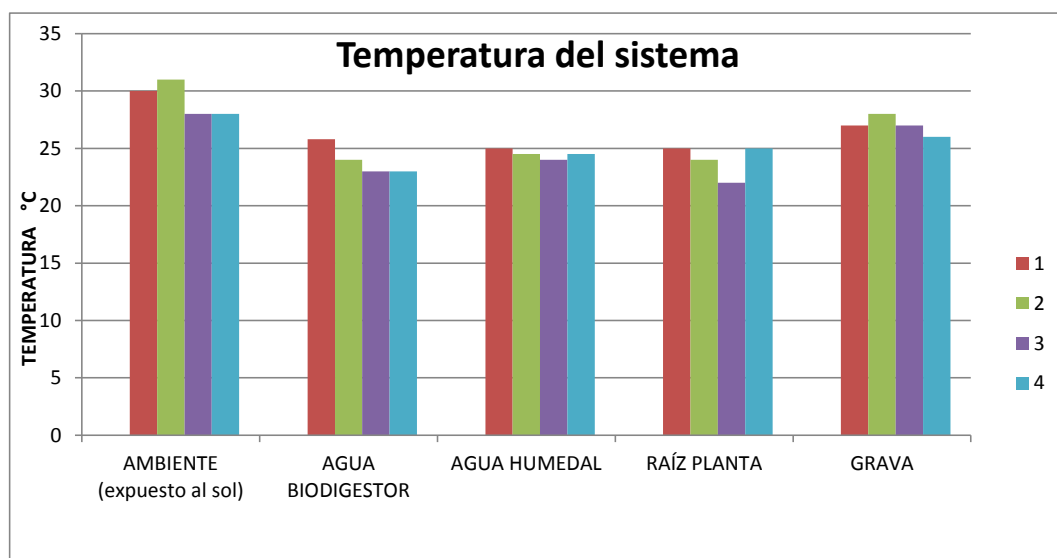


Figura 12. Gráfica comparativa de temperaturas de Sistema: Medioambiente, agua de biodigestor, agua del humedal, raíz de la planta, grava.

7.6 Operación y mantenimiento del Sistema Integral anaerobio-humedal

La operación y mantenimiento rutinarios de los humedales incluyen el control hidráulico y de la profundidad del agua, la limpieza de las estructuras de entrada y descarga, la inspección de la integridad de las mismas, el manejo de la vegetación del humedal y el monitoreo rutinario. La profundidad del agua en el humedal puede requerir ajuste periódico según sea la estación o en respuesta al aumento a largo plazo de la resistencia por la acumulación de detritos en los poros del medio (EPA 2000).

El control de mosquitos puede no ser requerido en Sistemas de humedales, en la medida que la superficie del agua se mantenga debajo de la superficie superior del medio. La remoción de contaminantes por parte de la vegetación es un mecanismo relativamente insignificante de manera que el corte y la remoción rutinaria de la vegetación no proporcionan un beneficio significativo en cuanto al tratamiento. La remoción de detritos acumulados no es necesaria, y en climas muy fríos sirve de aislamiento térmico para prevenir la congelación del lecho del humedal (EPA, 2000).

El Sistema anaerobio-humedal instalado, a régimen estacionario con gasto de 20 litros se procedió a acondicionar la siembra de las plantas acuáticas de especie: *Tipha* y *Cyperus* cultivadas en el humedal, que una vez consolidadas crecieron y florecieron.

Se realizaron podas periódicas de cada 3 a 4 meses, las especies *Tipha* y *Cyperus*, que crecieron a una tasa de aproximadamente de 4-5 centímetros por mes.

Los niveles de agua siempre se mantuvieron por debajo del sustrato en el humedal, ver figuras: 13, 14 y 15.

En el Sistema se muestrearon ARS en las entradas y salidas de cada unidad (biodigestor y humedal); para analizar los parámetros biológicos y las concentraciones del fármaco.



Figura 13. Verificación de la carga y libre acceso del flujo de ARS del Sistema Integral anaerobio-humedal en tanque alimentador Rotoplas®.



Figura 14. Verificación del nivel y flujo de ARS tratada por el biodigestor en el humedal, así como la poda de plantas maduras del Sistema Integral anaerobio-humedal.



Figura 15. Verificación de la salida del efluente (ARS tratada) del Sistema Integral anaerobio-humedal.

7.7 Análisis de los parámetros: DBO₅, DQO, OD, Temperatura, pH.

Análisis de los parámetros: Oxígeno Disuelto; OD, Demanda Química de Oxígeno; DQO, Demanda Bioquímica de Oxígeno; DBO₅, Temperatura.

Una vez que el sistema se encontró operando a régimen estacionario, que comprendió aproximadamente 8 meses posteriores a se tomaron muestras semanales en los tres puntos del proceso, por ocho semanas consecutivas en: el tanque alimentador al biodigestor de agua residual sintética más fármacos, en la salida del biodigestor y en la salida del humedal del Sistema integral anaerobio – humedal.

En el inicio de la alimentación al Sistema anaerobio-humedal; la formulación que se agregó al tanque Rotoplas[®] es agua sin tratar ARS más fármacos en solución. A la salida del biodigestor, agua tratada por el biodigestor anaeróbico y a la salida del humedal, agua tratada finalmente, por el Sistema integral anaerobio-humedal.

El muestreo en cada uno de los puntos de agua residual, fue realizado de acuerdo a las condiciones necesarias para la preservación de la muestra, que manda la NORMA MEXICANA NMX-AA-003-1980. Las muestras de aguas residuales, debidamente acondicionadas para su preservación se trasladaron en el laboratorio de CONAGUA de Chiapas, en Tuxtla Gutiérrez, dónde se realizaron los análisis correspondientes.

El muestreo se realizó conforme marca la norma la NORMA MEXICANA NMX-AA-003-1980, registrando en una hoja de custodia, cada muestreo, ver en el anexo. Que posteriormente se destinó a refrigeración 4°C por no más de 6 horas para ser analizadas posteriormente, para DBO₅, DQO, OD, pH (Cuadro 8). En virtud de que los resultados mostraron un patrón de repetición vecinal se optó por tomar un promedio de ellos.

Cuadro 8. De Normas aplicadas en los análisis de los parámetros de ARS tratadas por el Sistema anaerobio-humedal.

PARÁMETRO	NORMA	DENOMINACIÓN
DBO ₅	NMX-AA-028-SCFI- 2001	“Análisis de agua - determinación de la demanda bioquímica de oxígeno en aguas naturales, residuales (DBO ₅) y residuales tratadas - método de prueba (cancela a la NMX-AA-028-1981)”
DQO	NMX-AA-030/1-SCFI- 2012	“Análisis de agua - medición de la demanda química de oxígeno en aguas naturales, residuales y residuales tratadas.- método de prueba - parte 1 - método de reflujó abierto - (cancela a la NMX-AA-030-SCFI-2001).
OD	NMX-AA-012-SCFI- 2001	“Análisis de agua - determinación de oxígeno disuelto en aguas naturales, residuales y residuales tratadas” - método de prueba (cancela a la NMX-AA-012-1980).
pH	NMX-AA-008-SCFI- 2011	Análisis de agua - determinación del pH - método de prueba- (Cancela a la NMX-AA-008-SCFI-2000).
TEMPERATURA	NMX-AA-007-SCFI- 2013	Análisis de agua – medición de la temperatura en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - método de prueba (cancela la NMX-AA-007-SCFI-2000).

7.8 Para el análisis de los residuos de fármacos en el ARS tratada por el Sistema Integral anaerobio-humedal: Diclofenaco y paracetamol

Por otra parte después de un periodo de tres meses, a régimen permanente, se realizó el muestreo para la cuantificación de la concentración de fármacos en el Sistema, el muestreo inicialmente fue sencillo lo que reveló concentraciones muy similares, entonces se procedió tomando muestras compuestas y reportando las concentraciones promedio de ellas ver cuadro 10.

Para el análisis del diclofenaco y paracetamol, se tomó muestra en los tres puntos antes mencionados, la purificación de los fármacos presentes en el agua residual sintética, se llevó a cabo mediante cartuchos de fase sólida C18 conforme al método EPA 1694 (citada por la EPA, 2007).

Para la cuantificación del diclofenaco y paracetamol, se empleó la técnica de electroforesis capilar de zona en un equipo de la marca Beckham modelo MDQ, con una columna de sílice fundida de 10 cm de longitud y un diámetro interno de 75µm, el electrolito soporte fue una solución de fosfatos 30 mM a pH 8, se inyectó la muestra por 5 segundos a una presión de 0.5 psi. Con un límite de detección de 40 ng/L.

Para la determinación de la constante de fármacos en la ecuación de decaimiento de concentración a través del Sistema se ha procedido en aplicar la ecuación 2 procedente de la ecuación 1, expuesta en apartado 7.1.1 Cálculos de trabajo para el diseño y construcción del sistema anaerobio-humedal.

Despejando a K_t de la ecuación 1, se obtiene ecuación 2 con la que se calcula la constante de degradación, K_t :

$$\frac{\ln C_i - \ln C_e}{T} = K_t \quad \text{Ecuación 2}$$

VIII. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

8.1 Resultado del diseño y construcción del Sistema Integral anaerobio-humedal.

Concretamente el Sistema está integrado por un tanque Rotoplas[®] de 450 litros como suministrador al Sistema, un tanque dosificador al biodigestor de capacidad de 350 litros, un biodigestor con capacidad de 275 litros con empaque polimérico, el humedal con capacidad de 2840 litros, un tanque receptor al final.

El humedal Subsuperficial cuenta con un volumen de 2840 litros; construido en piso firme con cemento, con acabado fino en el interior, con un desnivel de aproximadamente 1%, se construyó piso de cemento a su alrededor, se construyó una caseta enmallada y con cubierta de policarbonato para permitir el paso de luz y cubrirlo de la lluvia. Posterior al humedal se construyó un tanque receptor de agua tratada, así quedó la adecuación del Sistema de tratamiento anaerobio-humedal de trabajo, tal como se puede apreciar en la figura 16 y 17 contenida en el apartado de Trayectoria que sigue el agua residual sintética ARS.

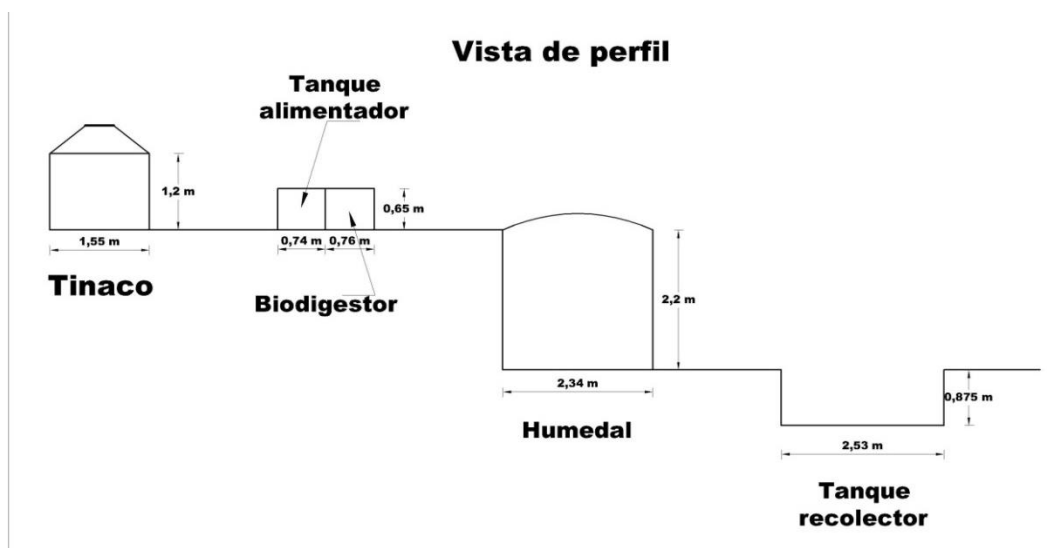


Figura 16. Sistema Integral anaerobio-humedal de tratamiento con tanque alimentador, tanque dosificador, biodigestor, humedal y tanque receptor de agua tratada.

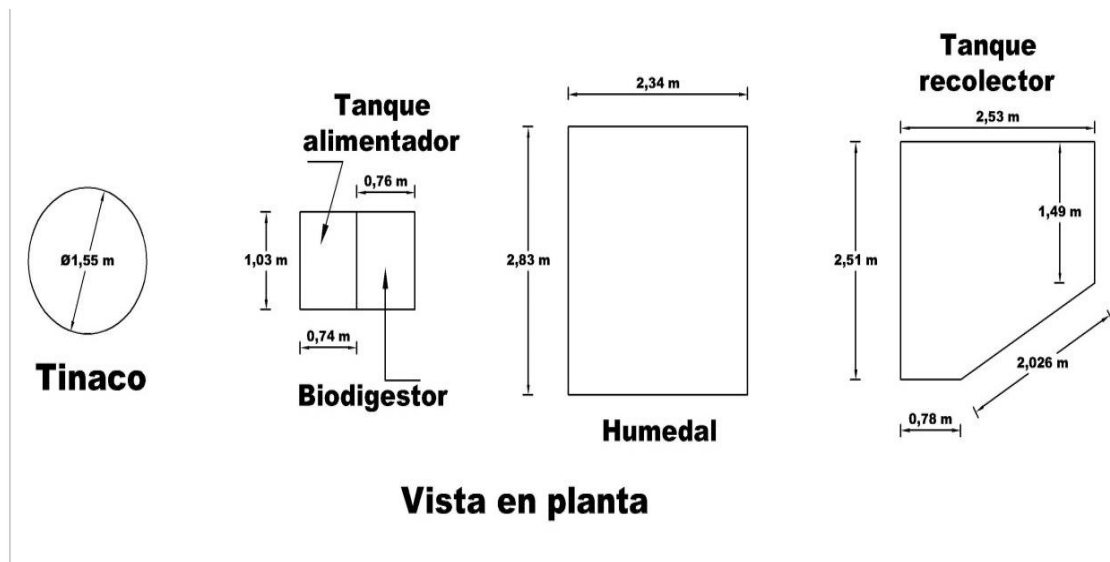


Figura 17. Sistema Integral anaerobio-humedal de tratamiento con dimensiones de tanque alimentador a biodigestor, tanque dosificador, biodigestor, humedal y tanque receptor de agua tratada, vista en planta.

8.2 Operación y mantenimiento del Sistema Integral anaerobio-humedal

El biodigestor operó con una eficiencia de 98% (figura 18 y 20), respecto a la eliminación de los fármacos (cuadro 10 y 11); con la diferencia de que el paracetamol sí se degradó toda vez porque no hay presencia, por otro lado según Sisamón (2003) y Russo (2012), un 5 % del total consumido es convertido en metabolito activo por el sistema de oxidación del citocromo P-450 que se encuentra presente en las células hepáticas, dando lugar a la N-acetil-para-benzoquinoneimina (NAPBQ). A dosis normales de paracetamol, que según Russo (2012) la pequeña cantidad de metabolito activo producido es detoxicada mediante conjugación preferente con glutatión reducido y eliminada en la orina como conjugados no tóxicos de cisteína y ácido mercaptúrico; residuos que fueron eliminados por el biodigestor, en el cuadro 10 puede observarse la ausencia de fármacos a la salida del humedal.

Respecto al diclofenaco que probablemente quedó fue algunos de sus metabolitos, según Sisamón (2003), mencionan que en el metabolismo se degrada el diclofenaco en metabolitos esto es lo que ha sucedido con el proceso en el Sistema de

tratamiento ya que posteriormente fue eliminado en el humedal totalmente, como muestra el cuadro 10.

Los resultados obtenidos en el biodigestor, es el siguiente:

$$K_t \text{ velocidad de reacción promedio} = 4.905 \text{ dias}^{-1} \pm 0.870$$

Como no se encontró presencia de fármacos (cuadro 10); por lo tanto la ecuación 3 correspondiente al humedal no se aplicó, confirmándose a través del Electroferograma de la figura 24, que no hay presencia de diclofenaco.

Cuadro 9. Concentraciones: inicial Ci y final Ce en el biodigestor del Sistema Integral anaerobio-humedal de diclofenaco y cálculo de la constante de velocidad de reacción, TRH de 24h.

Muestra	Agua sin tratar mg/L, Ci	Agua salida de biodigestor mg/L, Ce	Ln Ci	Ln Ce	T(días)	Kt = LnCi – LnCe/T
1	2.2	0.021899382	0.78845736	-3.821296885	1	4.609754245
2	2.177262178	0.025542784	0.778068206	-3.667400429	1	4.445468635
3	2.185571976	0.001850027	0.781877568	-6.292555045	1	7.074432614
4	2.315141762	0.033355227	0.839470922	-3.400540787	1	4.240011709
5	2.26622879	0.036489692	0.818117124	-3.310725469	1	4.128842593
6	2.132798073	0.01687239	0.757434767	-4.082076721	1	4.839511488
7	2.246993384	0.01777578	0.809593049	-4.029918409	1	4.839511458
8	2.175117935	0.01565403	0.777082886	-4.157026887	1	4.934109773
9	2.297223501	0.0165328	0.83170122	-4.102408993	1	4.934110213
Promedio	2.221815289	0.020663568				4.893972525
Desv. Stand=	0.062130806	0.01034226				0.870243111

8.3 Variación de los parámetros: DBO₅ DQO, OD, en el Sistema Integral anaerobio-humedal.

Los resultados obtenidos en DBO₅ (mg/L); en el agua residual sintética ARS en la alimentación al biodigestor presentan un promedio de 154.16 mg/L \pm 17.042, en la salida del biodigestor con un promedio de 57mg/L \pm 31.412, en la salida del humedal con un promedio de 13.01 mg/L \pm 5.59, ver (figura 18 y Cuadro 11 en anexo).

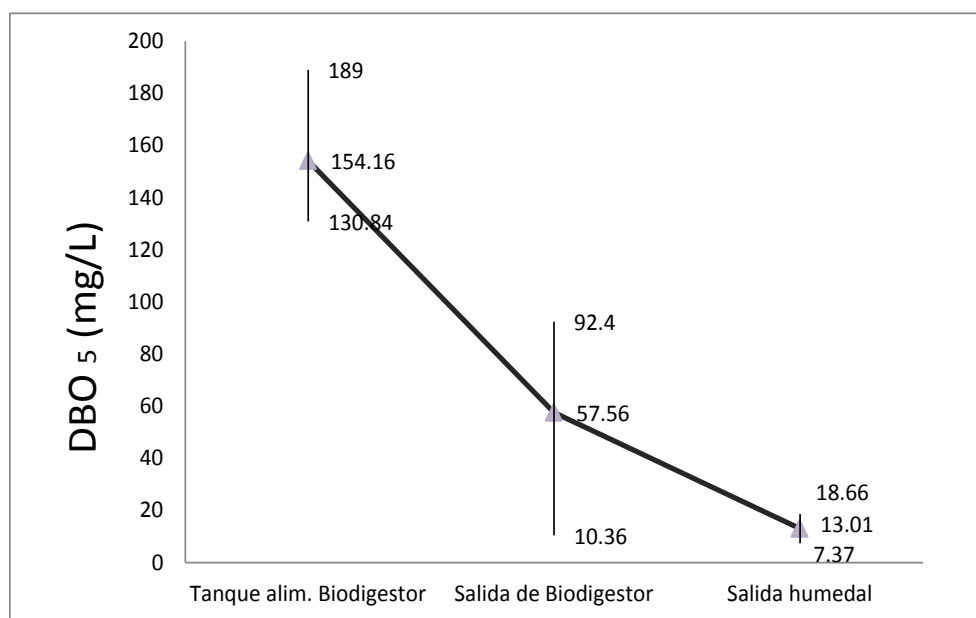


Figura 18. Gráfica de la Demanda Bioquímica de Oxígeno, DBO₅, del ARS tratada en el Sistema Integral anaerobio-humedal

Los resultados obtenidos en oxígeno disuelto OD (mg/L) del agua residual sintética ARS en la alimentación al biodigestor presenta un promedio de 7.28 mg/L \pm 1.492 , en la salida del biodigestor con un promedio de 0.38 mg/L \pm 0.142, en la salida del humedal con un promedio de 3.99 mg/L \pm 1.613, (Figura 19 y Cuadro 12 en anexo).

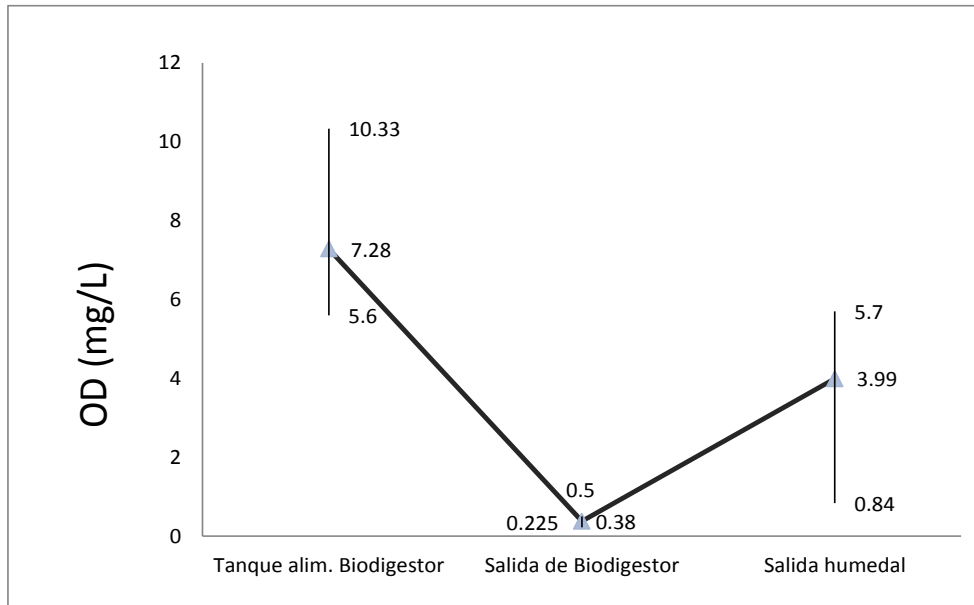


Figura 19. Gráfica del contenido del Oxígeno Disuelto OD, del ARS tratada por el Sistema Integral anaerobio-humedal.

Los resultados obtenidos en la demanda química de oxígeno DQO (mg/L) del Agua Residual Sintética ARS en la alimentación al biodigestor presenta un promedio de 131.54 mg/L \pm 10.859, en la salida del biodigestor con un promedio de 71.56 mg/L \pm 12.42, en la salida del humedal con un promedio de 41.93 mg/L \pm 4.582 (Figura 20 y Cuadro 13 en anexo).

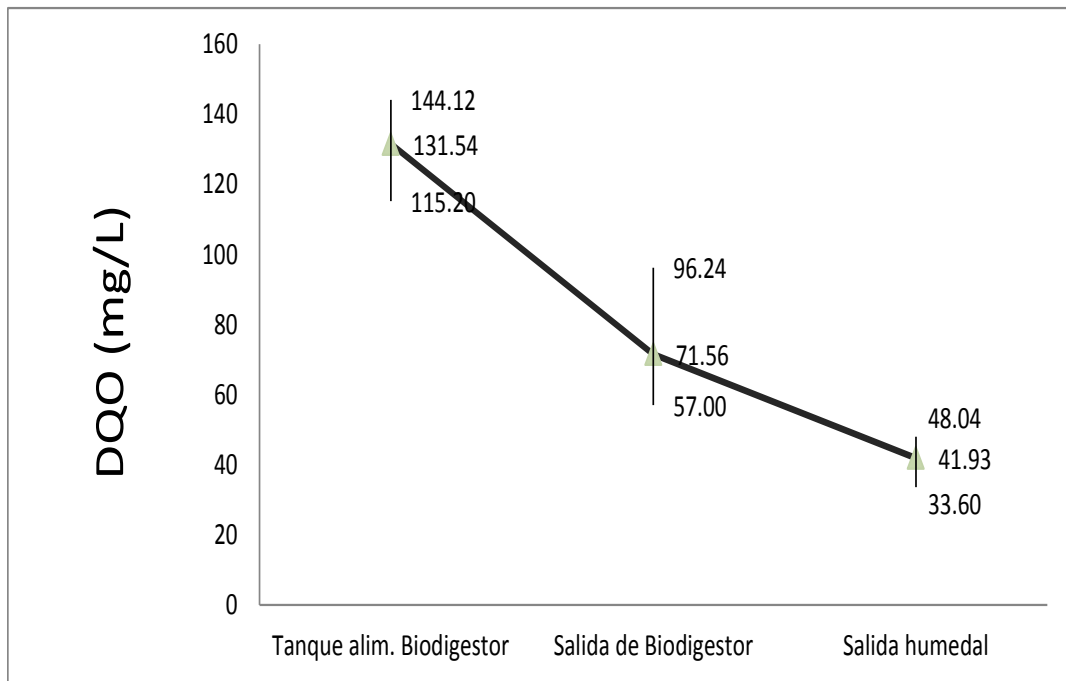


Figura 20. Gráfica de la demanda Química de Oxígeno DQO, del ARS tratada en el Sistema Integral anaerobio-humedal.

8.4 Resultados de análisis de fármacos.

Los resultados de los análisis de los fármacos se indican en la figura 22, se muestran los resultados que se obtuvieron se presentan en el cuadro 10, para el diclofenaco; se tiene resultados de agua sin tratar con resultados muy cercanos a lo que inicialmente se alimentó al Sistema, a la salida del biodigestor se tiene presencia de un residuo que no precisamente corresponde a diclofenaco y que posiblemente se trate de alguno de los metabolitos que genera la molécula de diclofenaco en su degradación biológica, no se puede asegurar hasta corroborar por otros métodos analíticos su naturaleza química.

A la salida del humedal no hay presencia de diclofenaco, pero si se observaron trazas de residuos (probable metabolitos) que se deben de identificar por otros métodos analíticos para su determinación (Figura 23). El cuadro 11 muestra el resultado de la eliminación de los fármacos paracetamol y diclofenaco del Sistema Integral anaerobio-humedal.

Cuadro 10. Resultados de análisis por electroforesis capilar, del fármaco diclofenaco, contenido en el ARS tratada por el Sistema Integral anaerobio-humedal.

Número de muestra	Agua sin tratar mg/L	Agua salida de biodigestor mg/L	Agua salida del humedal mg/L
1	2.2	0.021899382	N.D.
2	2.17	0.025542784	N.D.
3	2.185571976	0.001850027	N.D.
4	2.315141762	0.033355227	N.D.
5	2.26622879	0.036489692	N.D.
6	2.132798073	0.01687239	N.D.
7	2.246993384	0.01777578	N.D.
8	2.175117935	0.01565403	N.D.
9	2.297223501	0.0165328	N.D.
Desviación estándar	0.062130806	0.01034226	N.D.
Promedio:	2.221815289	0.020663568	N.D.



Figura 21. Gráfica de la concentración de diclofenaco en el ARS alimentado al biodigestor del Sistema Integral anaerobio-humedal.

La figura 22, muestra la concentración de los residuos del diclofenaco en el ARS tratada por el biodigestor, donde la concentración de éste es de un 98% de eliminación.

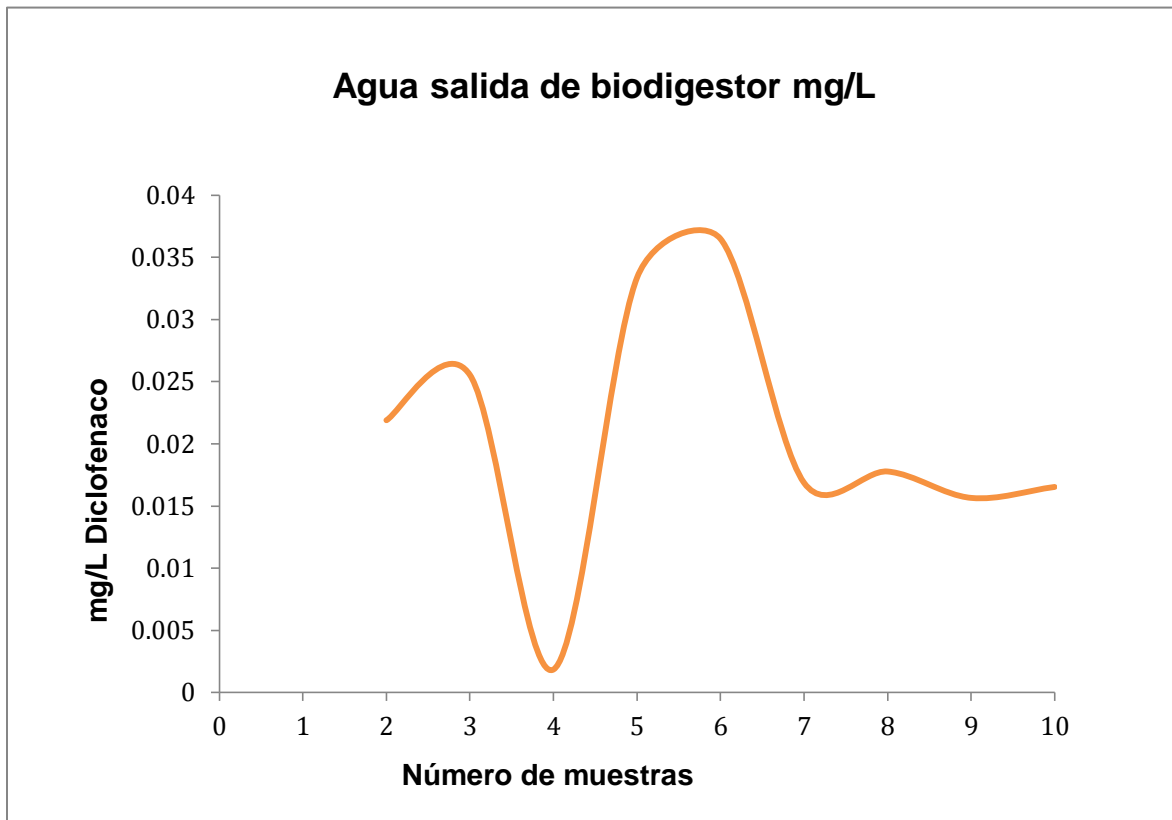


Figura 22. Gráfica del ARS tratada a la salida del biodigestor del Sistema Integral anaerobio-humedal.

En la figura 23 se observa las concentraciones comparadas en el Sistema Integral anaerobio-humedal; se puede observar que la concentración en la salida del humedal es nula.

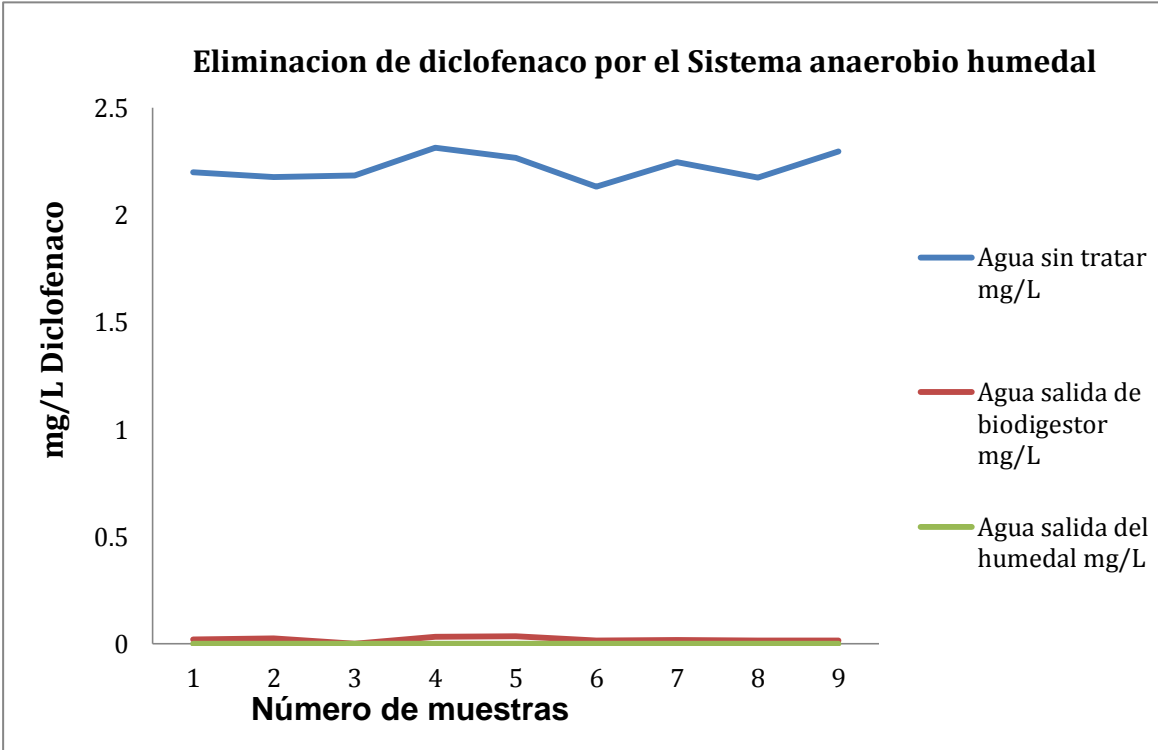


Figura 23. Gráfica incluyen ARS sin tratar, a la salida del biodigestor y a la salida del humedal del Sistema Integral anaerobio-humedal.

En el cuadro 11, se tienen los resultados cuantitativos de residuo del diclofenaco a la salida del biodigestor en concentraciones con promedio de $0.020663568 \text{ mg/L} \pm 0.01034226$ y el agua tratada a la salida del humedal es el final del Sistema; donde se puede apreciar claramente que no hay presencia de diclofenaco.

Cuadro 11. Eficiencias de eliminación por el Sistema Integral anaerobio-humedal de fármacos: diclofenaco.

Resultados eficiencia de eliminación del Sistema Integral anaerobio-humedal					
Número de muestra	Agua sin tratar mg/L	Agua salida de biodigestor mg/L	Agua salida del humedal mg/L	Eficiencias del biodigestor %	Eficiencia total del sistema %
1	2.2	0.021899382	N.D.	99.00457357	100
2	2.177262178	0.025542784	N.D.	98.82683931	100
3	2.185571976	0.001850027	N.D.	99.91535273	100
4	2.315141762	0.033355227	N.D.	98.55925769	100
5	2.26622879	0.036489692	N.D.	98.3898496	100
6	2.132798073	0.01687239	N.D.	99.20890823	100
7	2.246993384	0.01777578	N.D.	99.20890821	100
8	2.175117935	0.01565403	N.D.	99.28031351	100
9	2.297223501	0.0165328	N.D.	99.28031382	100
			N.D.		
Desviación estándar	0.062130806	0.01034226	N.D.	0.451155143	0
Promedio:	2.221815289	0.020663568	N.D.	99.07492407	100

El resultado que se obtiene de aplicar la ecuación de primer grado para el desempeño del biodigestor ecuación 3 , se puede observar en el cuadro 10, donde obtiene la constante de degradación del diclofenaco K_t , con un promedio de $4.905436668 \text{ días}^{-1} \pm 0.8702$ a temperatura promedio de $28.23 \text{ °C} \pm 2.86$.

Por otra parte, como una referencia de los valor típicos de los parámetros cinéticos, reportados en trabajos realizados por algunos autores, Lawrence and McCarty en

Acosta *et al.*, 2005 (ver cuadro 12) aunque estos datos son para materia orgánica, ya que en la literatura científica no se encontró constante de velocidad de reacción K_t específica para fármacos, para proceso anaerobio. Se considera como una comparación de operación para el Sistema anaerobio-humedal estudiado, en este trabajo.

Cuadro 12. Valores típicos de los parámetros cinéticos (proceso anaerobio).

Sustrato	Y(mg/mg)	b(d-1)	k (mg/mg.d)	Ks (mg/l)	T (°C)
Acetato	0.04	0.015	3.6	2130	20
	0.054	0.011	4.7	870	25
	0.058	0.037	4.8	333	30
Propionato	0.04	0.015		3860	20
	0.041	0.04	9.8	613	25
Estearato					
Palmitato	0.04	0.015	3.85	4620	20

Referencia: Lorenzo *et al.*, 2005.

En el análisis de fármacos, el caso del diclofenaco, presenta patrón repetitivo en las concentraciones; en el Electroferograma se puede observar los picos de la muestra de diclofenaco en el agua sin tratar, migran a los 9 minutos de acuerdo a la muestra patrón de diclofenaco. En el electroferograma del agua de efluente del biodigestor se observa el pico que migra a los 12 minutos diferentes en tiempo con 3 minutos de diferencia y corresponderá a otro compuesto.

Respecto al efluente del humedal no se observa ningún pico característico; por esta razón es que no se tiene ningún registro cuantitativo (Figura 24).

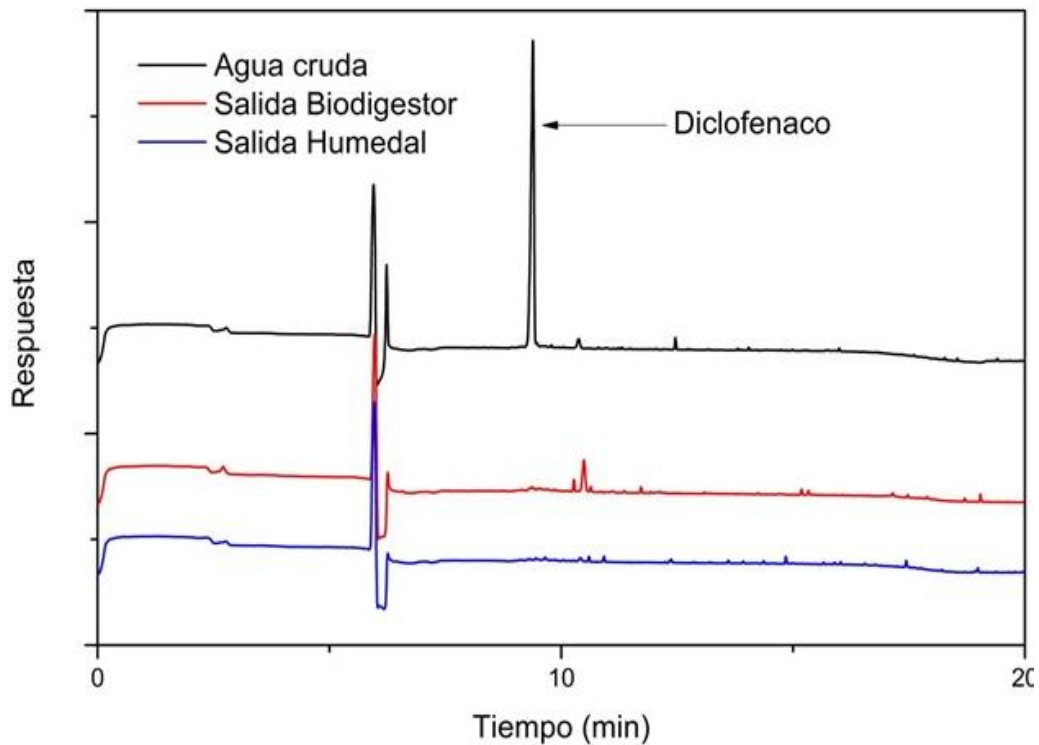


Figura 24. Electroferograma de la degradación del diclofenaco en el Sistema Integral anaerobio-humedal.

En el caso de paracetamol, es posible que se haya eliminado por los solventes durante la extracción por la solubilidad que presenta en éstos, (Tejada, 2014) y no se pudo detectar; sin embargo se realizó un análisis sin hacer la extracción del agua sin tratar, ARS, para corroborar su presencia y si se verificó; agregando un Spiking (alícuota del paracetamol patrón) para confirmar, se corroboró que si estaba presente en la muestra, (figura 25). No siendo posible de correr las muestras en estas condiciones, por razones de que el equipo se dañaría, al analizarlas directamente sin realizar la extracción que marca la técnica, consecuentemente no siendo posible la determinación del paracetamol en el sistema, por este método. Aunado a la dificultad que presenta el paracetamol en la solubilidad en agua por la posible inestabilidad en su polaridad (Bolaños *et al.*, 1999) (Figura 25).

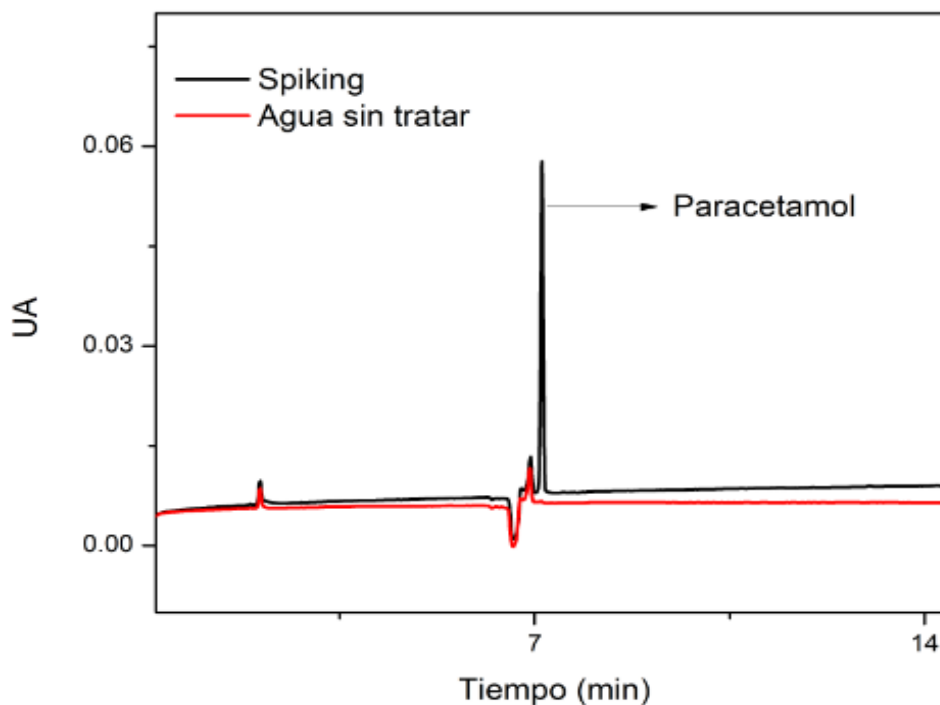


Figura 25. Electroferograma del paracetamol en el ARS sin tratar del Sistema integral anaerobio-humedal.

Por las razones expuestas respecto al paracetamol; se procedió al análisis estadístico por el método **One way anova** de datos obtenidos con el diclofenaco

Establecido para el análisis de hipótesis:

$H_0 \geq \mu \geq 2.24$ mg/L de diclofenaco

$H_i < \mu < 2.24$ mg/L de diclofenaco

Respecto a los resultados de las concentraciones de diclofenaco en el agua sin tratar (antes de recibir el tratamiento por el biodigestor)

Se obtuvo para el diclofenaco una X media = 2.2, una desviación estándar, $\sigma = 6.21308E^{-02}$

De acuerdo a Rivero y Monasterio, (2013), se calcula T_{crit} .

En reporte estadístico, proporcionó una T calculada (T_c)= 107.28 con una $p=0.0000$; en este caso se calculó T crítica (T_{cr})= 2.31, de acuerdo a la Ley de decisión es que sí $T_c > T_{cr}$, la $p < 0.05$ Por lo tanto la hipótesis nula se descarta, la normalidad que describe en el 95%, ver reporte estadístico en el anexo, también figura 26A y 26B.

Respecto a los resultados de las concentraciones de diclofenaco a la salida del biodigestor se obtiene para el diclofenaco una X media = $2.066357E^{02}$, una desviación estándar, $\sigma = 1.034226E^{02}$

Respecto a la concentración de diclofenaco y paracetamol en aguas residuales, autores reportan diferentes concentraciones de estos fármacos en aguas residuales (cuadro 13), sin embargo, cabe señalar que las muestra de aguas utilizada en el Sistema integral anaerobio-humedal no fueron tomada del drenaje municipal; sino que estas provienen de la formulación de Agua Residual Sintética (ARS) adicionadas con diclofenaco y paracetamol.

Cuadro 13. Concentraciones reportadas de fármacos en Aguas Residuales.

Fármaco	Entrada a PTARs	Salida a PTARs	Referencia
Diclofenaco	0.81 mg/ℓ a 2.1 mg/ℓ	-----	Henríquez Villa D., 2012 (Ternes, T.A. 1998)
Diclofenaco:	0.1 mg/ℓ a 17.0 mg/ℓ	0.1 mg/ℓ a 28.3 mg/ℓ	TEKNIFER:
Paracetamol	< 0.1 mg/ℓ a 53.6 mg/ℓ	< 0.1 mg/ℓ a < 0.1 mg/ℓ	TEKNIFER:
Paracetamol:	6.0 mg/ℓ Ternes, T.A. 1998.	-----	Henríquez, 2012 (Ternes, T.A. 1998)
Diclofenaco, Ibuprofeno, ketoprofeno, paracetamol, ácido salicílico.	HWws : 0.07-1.368 (µg/L) DWws: 0.01-483 (µg/L)	-----	Verlichi <i>et al.</i> , 2010

Se reporta, en análisis estadístico, una T calculada (T_c)=5.9939 con un valor de $p=0.000326$; en este caso se calcula T crítica (T_{cr})= 1.86, de acuerdo a la Ley de decisión es que sí $T_c > T_{cr}$, la $p < 0.05$ por lo tanto la hipótesis nula se descarta, la normalidad que describe en el 95%, ver reporte estadístico en el anexo, también figura 27A y 27B. En ambos casos se puede observar la distribución normal.

Por lo expuesto; se puede concluir que los resultados obtenidos, en los resultados de los análisis, por electroforesis capilar, son confiables con una $p < 0.05$ y que con esto se demuestra la efectividad del Sistema Integral anaerobio-humedal, en la eliminación de fármacos, en aguas residuales.

ARS más fármacos sin tratar por el Sistema Integral anaerobio-humedal.

Gráficas del análisis estadístico por medio del método: *One way anova*:

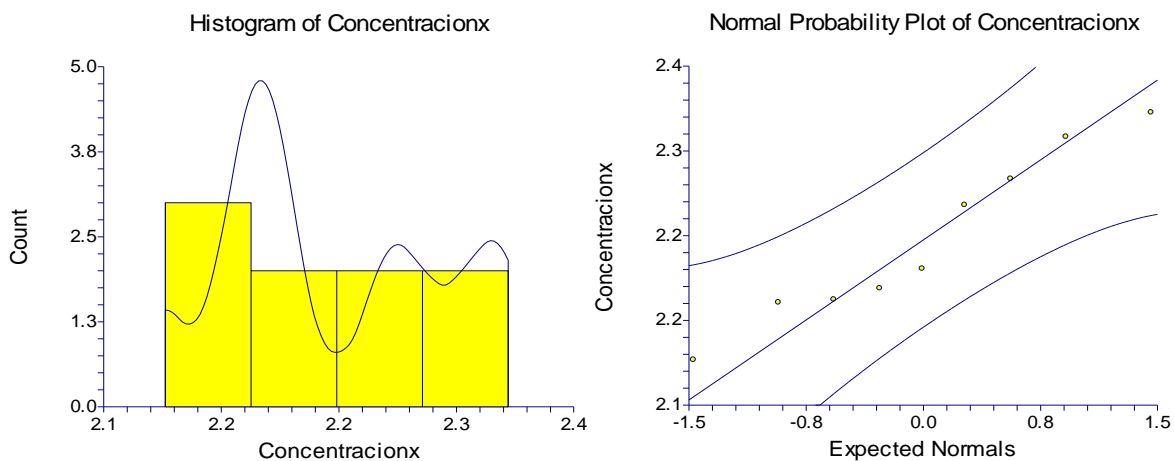


Figura 26. A) Histograma de concentración y B) Distribución normal de concentración de diclofenaco de ARS más fármacos sin tratar por el Sistema integral anaerobio-humedal.

ARS más fármacos a la salida del biodigestor del Sistema Integral anaerobio-humedal: Gráficas del análisis estadístico por medio del método: *One way anova*:

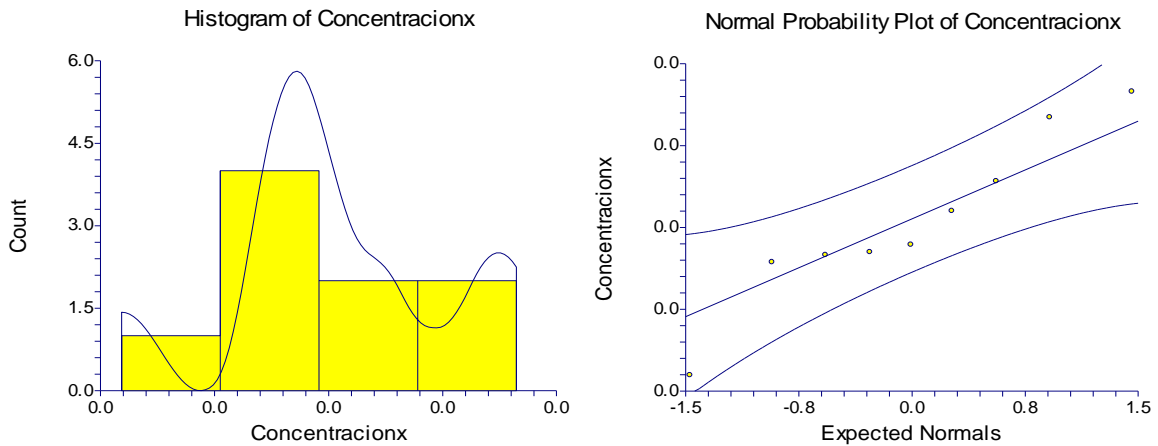


Figura 27. A) Histograma de concentración y B) Distribución normal de concentración de diclofenaco, en ARS más fármacos tratada por el Sistema Integral anaerobio-humedal.

IX. CONCLUSIONES

-El Sistema Integral biológico-humedal construido y operado adecuadamente permite la eliminación de fármacos, en el efluente del humedal no se detectó analíticamente presencia de diclofenaco ni paracetamol, alimentado al inicio del Sistema experimental, dónde se obtuvo una constante de biodegradación en el biodigestor de K_t velocidad de reacción, promedio= **4.905 días⁻¹±0.870**; con una $p < 0.05$.

-Los valores típicos de la constante k_t del proceso anaerobio, en aguas residuales corrientes fueron: para acetatos de 3.6 a 4.8 mg/mg d, para propionatos 9.8 mg/mg d, para palmitatos 3.85 mg/mg d; resultado de una biodegradación anaeróbica.

-Con el humedal construido expresamente para esta investigación se obtuvieron eficiencia de un 98% en residuos del producto del biodigestor, fármacos antiinflamatorios y analgésicos.

-Las plantas de las especies *Typha spp.* y *Cyperus L.* empleadas en la construcción de humedales en esta investigación fueron de gran utilidad por su adaptabilidad climática y se obtuvieron muy buenos resultados.

-Comparando un humedal con un tratamiento convencional, la inversión inicial puede ser ligeramente superior, sin embargo se amortizaría esta diferencia en un periodo relativamente corto.

-Así pues ésta técnica de depuración para todo tipo de contaminantes es válida, económica, con bajo mantenimiento, no consume energía, es efectiva y deberá considerarse como alternativa, o como un complemento a una PTAR convencional.

X. RECOMENDACIONES

En virtud del Sistema que se ha propuesto y estudiado en lo posible; es conveniente estudiar los tres aspectos más importantes: que es lo que sucede con la planta integralmente después de procesar bioquímicamente los residuos de contaminantes en este caso de los fármacos diclofenaco y paracetamol, que residuos quedan en el sedimento y sustrato, que clase de microorganismos se desarrollan favorablemente y como participan en este proceso de degradación.

Analíticamente se necesitan desarrollar técnicas adecuadas para la identificación de estos contaminantes CE.

Por tratarse de un sistema biológico complejo, en el desempeño bioquímico se deberá estudiar con más profundidad la adsorción, absorción y la bioacumulación sí lo existiera y de qué naturaleza química representan los residuos de sustancias farmacológicas, en cuestión como CE.

Es importante estudiar el impacto ecotoxicológico del contenido de estos contaminantes CE en el agua, en la salud pública y medioambiental incluyendo a las especies acuáticas aunque en estos últimos ya se han reportado los daños que les ocasionan, por parte de varios autores.

Es importante considerar realizar un estudio cuidadoso respecto a los gases de efecto invernadero (GEI) y los humedales; aunque es en cierta medida complicado.

Es necesario conocer más sobre los mecanismos bioquímicos que desempeñan las plantas acuáticas en un sistema humedal y el ecosistema.

Es conveniente considerar la implementación de programas intersectoriales de manejo adecuado de fármacos caducos y en demasía para evitar que terminen contaminando de cualquiera de las formas sea aguas residuales y/o lixiviados.

XI.BIBLIOGRAFÍA

Acosta, L.Y., y Obaye, A. M. C. 2005. La digestión anaerobia. Aspectos teóricos. Parte IICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar [en línea] 2005, XXXIX : [Fecha de consulta: 10 de octubre de 2015] Disponible en:<<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=223120659006>>

Adams, C.D. 2010. Cyperaceae. In: Flora Mesoamericana. [En línea]:[Consultado 23/noviembre/2015] disponible en: < <http://www.tropicos.org>>.

Aguado-Alonso, J. 2009. Análisis de fármacos en aguas residuales [en línea]: [Consultado en Noviembre 2012]. Disponible en: <<http://www.madrimasd.org/blogs/remtavares/2009/01/31/112064>>

Altmajer-Deisi, V. 2014. Contaminantes emergentes. Contaminación del agua nuevos desafíos y soluciones. Fundación empresa Universidad de Granada, España. 203 pp

Arslan, I., Dogruel, S., Baykal, E., y Gerone, G. 2004. Combined chemical and biological oxidation of penicillin formulation effluent. *Journal of Environment Manager*, 73(2): 155-163.

APHA 1998. Standard Methods for Examination of Water & Wastewater. (A. E. Lenore S. Clescerl, Ed.) págs. 3-6.

Ayala, V. N. y Fernández, V. G. 2010. “Propuesta para el tratamiento de medicamentos caducos que se acumulan en casa habitación” Ingeniería Ambiental, UNAM, México. Pp. 2 -8.

Barceló, D. y López, A. M. J. 2008. Difusión de proyecto. "Fundación Cultura del Agua" Instituto de Investigaciones Químicas y Ambientales-CSIC. Barcelona, España. Pp.1-18.

Barceló L. D. y López M. A. M. J. 2011. Contaminación y calidad química del agua: el problema de los contaminantes emergentes. Instituto de Investigaciones Químicas y Ambientales-CSIC. Barcelona, España .Pp. 2-27.

Berlanga, R, C. A., Ruiz, L. A., y De la Lanza, E. G. 2008. Esquema de clasificación de los humedales de México. *Investigaciones Geográficas: Boletín del Instituto de Geografía*. UNAM, Núm. 66. 25-46 pp

Becerril, B. J.E. 2009. *Revista De la UNAM*. Volumen 10 Número 8 • Pp 2-7.

Bolaños, C. I., Alonso, E. E., Luengas, P., Barbosa, H. y Martínez, F.1999. Solubilidad de Acetaminofén en los sistemas agua-alcohol USP- jarabe USP y Agua-Alcohol USP- Sorbitol USP. *Revista Colombiana de Ciencias Químico-farmacéuticas*. Pp. 71-75.

Bondia, J.R. 2014. Eliminación de contaminantes emergentes mediante Humedales Artificiales como sistema alternativo o complementario a un tratamiento de aguas convencional Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente. Tesis. Universidad Politécnica de Valencia. 66 pp.

Bonilla, B. J.R. y Santamaría, A. B. 2012. Thypaceae. Flora del bajío y de regiones adyacentes. Núm. 176. 1-13 pp

Bonilla, B. J.R., y Santamaría, B. 2013. Plantas acuáticas exóticas y traslocadas invasoras. In: R. Mendoza y P. Koleff (coords.). *Especies acuáticas invasoras en México*. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, México. 223-247 pp

Constanza, G. S. 2012. Gestión integral de residuos. Facultad de Agronomía. Universidad Nacional de Tucumán. San Miguel Tucumán Argentina. [En línea]. [Consultado Marzo 2015]. Disponible en: <<http://slideplayer.es/slide/1181111/>>

Curt, F.M.M. 2013. Capítulo 7: Macrofitas de interés en fitodepuración. Manual de fitodepuración. Filtros de macrofitas en flotación, [en línea]. Proyecto Life. , [Consultado Marzo 2015]. Disponible en < www.ciencias-marinas.uvigo.es/.../Manual%20de%20fitodepuracion/Cap>

Chong, N., Jin, B., Chow C., y Saint, C. 2010. *Recent developments in photocatalytic water treatment technology: A review. Water Research*, (44): 2997-3027.

Crites y Tchobanoglous, 2002. Tratamiento de aguas residuales en pequeñas poblaciones, 2ª edición. Edit. Mc. Graw-Hill. México. Pp. 348 - 418.

Conagua 2015. Comunicado de Prensa No. 201-15 (1), [en línea], [Consultado en Abril 2015]. Disponible en <cnacomsoc@conagua.gob.mx, www.conagua.gob.mx>

Debecker, P., Hulea, V., y Mutin, H. 2013. Mesoporous mixed oxide catalysts via non-hydrolytic sol-gel: A review. *Applied Catalysis A: General* (451): 192-206.

Delgadillo, O., Camacho, A. Pérez, L. F. y Andrade, M. 2010. Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales. Serie Técnica. Centro AGUA de la UMSS (Bolivia) y el Departamento de Productos Naturales, Biología Vegetal y Edafología de la Universidad de Barcelona, España. Cochabamba , Bolivia. Pp. 98-135.

Díaz M.G., y Ronco A. 2007. Ensayo de toxicidad aguda con *Daphnia magna*. International Development Research Center. [En línea]. Disponible [Consultado en noviembre,2013].<<http://www.idrc.ca/EN/Resources/Publications/openebooks/147-7/index.html>>

Domínguez, A. B. R., y Gutiérrez P.C. 2010." Estudio de generación de residuos peligrosos domésticos en una zona habitacional". Facultad de Ingeniería, UNAM, México. 29 pp.

Durruty I. 2013. Biodegradación Anaerobia de efluentes del proceso de papas. Departamento de Ingeniería Química. Tesis. Universidad Nacional de la Plata. Buenos Aires Argentina. Pp.260

Estadísticas del Agua en México 2007." Comisión Nacional del Agua (Conagua). [en línea] [Consultado noviembre 2015] Disponible en: <www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Contenido/.../PNH_05-08.pd>

Estrada, G.I.Y., 2010. "Monografía Sobre Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial (HAFSS) para remoción de metales pesados en aguas residuales". Facultad de Tecnologías. Escuela de Química. Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira.Pp.178.

Environmental Protection Agency, EPA. 2000. "Folleto informativo de tecnología de aguas residuales". United States Office of Water EPA 832-F-00-024. Washington, D.C. Pp.10

EPA. 2000. "Folleto informativo de tecnología de aguas residuales Humedales de flujo subsuperficial." EPA 832-F-00-023 Environmental Protection Washington, D.C.Pp.11.

EPA. 2007. Method 1694: Pharmaceuticals and Personal Care Products in Water, Soil, Sediment, and Biosolids by HPLC/MS/MS. Págs 27-43, 42-45, 65-68.

Foro Mundial del Agua. 2002. [en línea], [Consultado en abril 2014]. Disponible en: < www.produccion-animal.com.ar>.

García, S. I.E., Vázquez, S., Penna, C. and Cassán, F. 2010. Rizosfera, Biodiversidad y Agricultura Sustentable. Publicación Electrónica del Taller Internacional. Ciudad Autónoma de Buenos Aires. Buenos Aires. Argentina. 261-290 pp.

García, G. C., Gortáres M. P. y Droguí P. 2011. Contaminantes Emergentes: efectos y tratamientos de remoción. *Revista Química Viva* No 2 (10). Instituto Tecnológico de Sonora, Cd. Obregón Sonora. Pp.50

GIAS. 2014. Contaminantes emergentes: Impacto Ambiental y Alternativas de Manejo. Grupo de Investigación en Agua y Saneamiento-GIAS. Facultad de Ciencias Ambientales. Taller. Universidad Tecnológica de Pereira. Pereira, Colombia.

Gil, M. J., Soto, A. M., Usma, J. I., y Gutiérrez, O. D. 2012. Contaminantes emergentes en aguas, efectos y posibles tratamientos. *Producción + Limpia*- Julio-Diciembre. Vol.7 (2): 52•73. Instituto tecnológico Metropolitano. Colombia.

Gogate, P., y Pandit, A. 2004. A review of imperative technologies for wastewater treatment II: hybrid methods. *Advances Environmental Reserch*, 8(3-4): 553-97.

Guillén, T. H. A. 2015. Apuntes para la materia de Procesos Biológicos. Facultad de Ingeniería Civil, UNACH. México. Pp.20.

Gunnarsson, L., Adolfsson, M., Björleinius, B., Rutgersson, C., Förlin, L., y Larsson, D. 2009. Comparison of six different sewage treatment processes - reduction of estrogenic substances and effects on gene expression in exposed male fish. *Science Total Environmental*, 407(19): 5235-5242.

Henríquez V.D., 2012. "Presencia de Contaminantes Emergentes en aguas y su impacto en el ecosistema. Estudio de caso: productos farmacéuticos en la cuenca del Río Biobío", región del Biobío, Tesis: Universidad de Chile, Chile.Pp.387.

Hewitt, Paul G. 2009. *Conceptos de Física*, Editorial Limusa S.A. de C.V. Editorial.Pp.682.

Hijosa, V. M., Matamoros V., Sidrach, C. R., Martin, V. J., Bécares, E., Bayona J.M. 2010. Comprehensive assessment of the desing configuration of constructed wetlands for the removal pharmaceuticals and personal care products from urban wastewaters. *Water research*, 44: 3669-3678

Ike, F., Asano, M., Belkada, F., Tsunoi, S., Tanakas, M., y Fujita, M. 2002. Degradation of biotransformation products of nonylphenol ethoxylates by ozonation and UV/TiO₂ treatment. *Water Science and Technology*, (46):127-132.

INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e informática). 2010. Información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos [en línea]. [Consulta: 20 Febrero 2015]. Disponible en < <http://www.inegi.org.mx/>>

Jiang J. Q, Zhou, Z. Sharma, V.K.. 2013. Review article Occurrence, transportation, monitoring and treatment of emerging micro-pollutants in waste water. *A review from global views*. *Microchemical Journal* 110 (2013):292–300. USA.

Kadlec R. H. and Knight R.L. (1996) *Treatment Wetlands*. First Edition, CRC Press: Boca Raton, Florida.Pp. 87.

Kadlec, R.H. and Wallace S. D. 2009. *Treatment Wetlands*. Second Edition. Boca Raton, London, New York. CRC PRESS. Pp. 965

Kavanagh, L. J., y Keller, J, 2007. "Engineered ecosystem for sustainable on-site wastewater treatment". Vol. 41(8): 1823-1831. Queensland. St. Lucia, Australia.

Kiely G. (1999). *Ingeniería Ambiental*. Editorial McGraw-Hill/Interamericana. España. Pp. 763-776.

López Rosas.2007. Respuesta de un humedal transformado por la invasión de la gramínea exótica *Echinochloa pyramidalis* (Lam.) Hitchc.& A. Chase A los disturbios inducidos (cambios en el hidropериodo, apertura de espacios y modificación de la intensidad lumínica). Tesis doctoral. Ecología y manejo de recursos naturales. Instituto de Ecología A.C. Xalapa, Veracruz. Pp. 125.

Liberti L. y Notarnicola M. (1999). Tratamiento Avanzado y desinfección de las aguas residuales municipales reutilización en la agricultura. *Ciencias del Agua. Technol*, 40:235-245.

López-, M. S., E. Gallegos, M. M., J. Pérez, F.L y Gutiérrez, R. M. 2005. Mecanismos de Fitorremediación de Suelos Contaminados con Moléculas Orgánicas Xenobióticas. *Revista Internacional de contaminación ambiental. Rev. Int. Contam. Ambient.* Vol. 21 (2) 91-100.

Lorenzo, A.Y., y Obaya, A. M. C. 2005. La digestión anaerobia. Aspectos teóricos. Parte IICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar [en línea] 2005, XXXIX

(Sin mes): [Fecha de consulta: 7 de marzo de 2015] Disponible en: <<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=223120659006>>

Ludlow W. B. y Diego P.N. 2002. Utilidad e importancia Histórica y cultural de las cyperaceae. Departamento de Ecología y Recursos Naturales; Departamento de Biología Confrontada, Facultad de Ciencias, UNAM. *Etnobiología* (2):1-13.

Marín, R. J. M. 2010. “Desarrollo de metodología Analítica para la determinación de residuos contaminantes orgánicos en aguas y vegetales mediante LC/MS/MS con analizador de triple cuadrupolo”. Tesis doctoral. Instituto Universitario de Plaguicidas y Aguas, España.Pp. 380.

Mantzavinos, D., y Psillakis, E. 2004. Enhancement of biodegradability of industrial wastewaters by chemical oxidation pre-treatment. *Chemical Technology Biotechnology*, (79): 431-454.

Manzano, E. 2008. Eliminación de fármacos presentes en aguas residuales urbanas mediante procesos tipo Fenton heterogéneos, [en línea]. [*Consultado el 4 de Noviembre de 2013*]. Disponible en <<http://eciencia.urjc.es/handle/10115/5568>>

Metcalf and Eddy, INC. Biological Unit Process.1979. In: *Wastewater Engineering: Treatment, disposal, reuse*. New York, McGraw Hill. Cap. 9: 393-467 pp.

Metcalf and Eddy, 1998. *Ingeniería de aguas residuales: tratamiento, vertido y reutilización*. Tercera edición. Edit. Mc. Graw-Hill, México. Pp.271-345.

Medina Nava Martina, 2015. Humedales: los riñones del mundo. Saber más. Revista de divulgación de la Universidad de Michoacán de San Nicolás Hidalgo, Michoacán.Pp.1-3.

Metabolitos del diclofenaco: [en línea] [Consultado en Octubre 2014]. Disponible en:

http://www.geosalud.com/medicamentos/diclofenaco_sodico_50_miligramos.html

Moreno Ana Rosa, México, 2001, " Cambio Climático y sus Efectos en la Salud Humana" [en línea] [Consultado agosto 2015]. Disponible en: <www.ambiente.gov.ar/.../salud.../agua%20cambio%20clim%20tico%20y.>

Moreno A. 2011. Guía Metodológica para el análisis Científico de la información en Salud. Tomo 1: El análisis descriptivo aplicado-Nociones de estadística inferencial. Asunción. USAID-CIRD.

Núñez, L.R. A., Vong, Y. M., Ortega, B. R., y Olgún E.J. 2004 • Fitorremediación: fundamentos y aplicaciones. Centro De Investigación Y Desarrollo Tecnológico En Electroquímica, S.C. Pedro Escobedo, Qro.Pp. 180

Vázquez, R. P., Vicente, A, Onghena M., Blasco, C., Picó, Y. 2011. "Assessment of the occurrence and distribution of pharmaceuticals in a Mediterranean wetland (L'Albufera, Valencia, Spain) by LC-MS/MS". *Anal Bioanal Chem.* Pp. 400. España.

Palacios E. E. 2000. "Vegetación y flora del parque ecológico y recreativo "El Zapotal", Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. Tesis. Facultad de biología. Universidad Veracruzana. Xalapa Veracruz, México.Pp.23

Patiño Y, Díaz E. y Ordóñez S. 2014. Microcontaminantes emergentes en aguas: tipos y sistemas de tratamiento. *Avances en Ciencias e Ingeniería - Cien. ing.* 5(2):1-20.

Petrovic, M., Gonzalez, S., y Barceló, D. 2003. Analysis and removal of emerging contaminants in wastewater and drinking water. *Trends in Analytical Chemistry*, 22(10): 685-696.

Quesada P.I., 2009. Métodos no convencionales para el tratamiento de aguas contaminadas con productos farmacéuticos". Tesis doctoral: "Instituto Nacional Politécnico de Toulouse, Escuela Toulouse, Francia. Pp. 24-28.

Qing, Z. D., Soon, K. T., Gersberg, R. M., Sadreddini, S., Junfei Z. N. T. 2011. "Removal of pharmaceutical compounds in tropical constructed wetlands." *Ecological Engineering*. Vol.37: 460-464 Pp. San Diego, California.

Ramalho. R. S. 2003. Tratamiento de aguas residuales. Edit. Reverté, S.A. Barcelona España. Pp.: 503-533.

Ramos Alvariño Caridad, 2009." Physic-chemical properties of human consumption drugs in water". *Revista cubana de Higiene, Epidemiología, y microbiología*. Volumen 47, No.2, Centro Nacional de Investigaciones Científicas (CENIC). Ciudad de La Habana, Cuba

Rzedowski Jerzy. 2006. Vegetación de México. Primera edición digital. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. 504 pp.

Rentería, G. y Pérez, F. J. 2000. Cálculo de un índice de pobreza de agua a nivel de estados. División de Ciencias Económico Administrativas Universidad de Guanajuato. Págs.: 2-10.

Rivero, D. R. y Monasterio D. 2013. Probabilidad y estadística aplicada a la ingeniería, [en línea]. Unexpo, [Consultado octubre 2015]. Disponible en <<http://www.bqto.unexpo.edu.ve/>>

Rodríguez, A. A., Letón García P, Rosal García R., D. Valiño M., Villar Fernández S., M. Sanz García J., 2006. Tratamientos avanzados de aguas residuales industriales. REMTAVARES (Red Madrileña de Tratamientos Avanzados de Aguas Residuales) de la Comunidad de Madrid. Pp. 12-57.

Rodríguez, S. I. M., y Lozano, R. W. A. 2012. Preparación, composición y uso de agua residual sintética para alimentación de reactores prototipo y de laboratorio. Año 8, Número 11, Revista Didáctica de Ambiental. Bogotá D.C., Colombia. Pp.10-16.

Rodríguez V. J. A. 2015. Tratamiento Anaerobio de Aguas Residuales [en línea]. [Fecha de consulta: 2 de mayo de 2015]. Disponible en: www.ingenieroambiental.com/4014/tratamiento545.pdf universidad el Valle. Cali - Colombia

Romero Aguilar M., Colín-Cruz A., Sánchez-Salinas E. y Ortiz-Hernández M. L., 2009. "Tratamiento de aguas residuales por un sistema piloto de humedales artificiales: evaluación de la remoción de la carga orgánica" Revista. Internacional Contaminación Ambiental: 25 (3) 157-167, 2009.

Russo D. K. 2012. Paracetamol, [en línea]. [Consultado en marzo 2013]. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad de Belgrano. Disponible en: <www.ub.edu.ar/revistas_digitaless/Ciencias/Vol8Numero6/Articulo.pdf>

Sánchez O., Herzig M., Peters E., Márquez R., Zambrano L.. 2007. Perspectivas sobre conservación de ecosistemas acuáticos en México. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales Instituto Nacional de Ecología. U.S. Fish & Wildlife Service. Unidos para la Conservación, A.C. Universidad Michoacana de San Nicolás Hidalgo. Pp. 297.

Sánchez San Román F. J.. 2009. Flujo en medios porosos: Ley de Darcy Dpto. Geología--Univ. Salamanca (España) [en línea][Consultado en marzo 2014.]. Disponible en: <<http://web.usal.es/javisan/hidro>>

Sánchez Font, D. 2009. *Depuración de aguas residuales de una población mediante humedales artificiales*. Universitat Politècnica de Catalunya.

Santos Morcillo, J. L., 2006. “Análisis y distribución de principios activos Farmacológicos en los procesos convencionales de depuración de Aguas Residuales Urbanas”. Tesis doctoral Instituto Catalán de Investigación del Agua (ICRA), España. Pp.376.

Secretaria de 3er. Foro Mundial del Agua, Aguamarket, 2002. [En línea] [Consultado en abril 2015] Disponible en: <https://virtual.upaep.mx/...Agua/Nuevo_indice_Pobreza_Agua.pdf >

Semarnat. Cambio climático. Ciencia, evidencia y acciones. México. 2009.[En línea], [Consultado en mayo2015]. Disponible en: <www.semarnat.gob.mx/archivosanteriores/.../05.../cambio_climatico.pdf>

Sirtori, C., Zapata, A., Oller, I., Gernjak, W., Agüera, A., y Malato, S. (2009). Decontamination industrial pharmaceutical wastewater by combining solar photo-Fenton and biological treatment. *Water Reserch*, (43), 661-668.

Sisamón Ignacio A. 2003. Acerca de la hepatotoxicidad del paracetamol. *Revista del Hospital Privado de Comunidad* 2003; vol 6, nº 2 Hospital Privado de Comunidad. Córdoba 4545. (B7602CBM) Mar del Plata. Argentina. Pags.: 2-6

Sulaiman I Al-Sohaim, Rahmat Awang, Sa'ed H Zyoud, Sazaroni Md Rashid and Sirajuddin Hashim. 2012. “Evaluate the impact of hospital types on the availability

of antidotes for the management of acute toxic exposures and poisonings in Malaysia.” *Human and Experimental Toxicology*, 31 (3) Págs. 274- 281. Malasia.

Tejada C., Quiñones E., Peña M. 2014. Contaminantes Emergentes en Aguas: metabolitos de fármacos. Una revisión. *Revista Facultad de ciencias básicas. Universidad Politécnica de Granada. Volumen 10 • Número 1 • Páginas 80-101*

Tejada Allan, Michelle Macías, Zaira López, Florentina Zurita.2014. Comparación de la eficiencia de tres sistemas de humedales híbridos para la remoción de carbamazepina; Resultados preliminares Centro Universitario de la Ciénega, Universidad de Guadalajara, Av. Universidad 1115, Ocotlán, Jalisco, México

Ternes, TA. 1998. La aparición de las drogas en las plantas de tratamiento de aguas residuales y ríos alemanes. *Investigación del agua.*, Volumen 32, Número 11,1 de Noviembre 1998, pp 3245 hasta 3260 (16). Editorial Elsevier.

Tixier, C., Singer, H., Ollers, S., y Muller, S. 2003. *Occurrence and Fate of Carbamazepine, Clofibric Acid, Diclofenac, Ibuprofen, Ketoprofen, and Naproxen in Surface Waters. Environmental Science & Technology*, (37), 1061-1068.

Valsero-María Hijosa , Victor Matamoros, Javier Martín-Villacorta , Eloy Becares, Josep M. Bayona. 2010. “Assessment of full-scale natural systems for the removal of PPCPs from wastewater in small communities”. *Investigaciones en Agua: 4 4*, Págs. 1429–1439.

Valverde Solís Arlyn. 2010. Estimación de gases de efecto invernadero en humedales contruidos de flujo subsuperficial horizontal. Universidad del Valle facultad de ingeniería. Escuela de ingeniería de los recursos naturales y del ambiente. Santiago de Cali, Colombia.

Vázquez I. M. A. 1997. Etnobotánica de los zoques de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. Instituto de Historia Natural, Gobierno del Estado de Chiapas. Tuxtla Gutiérrez, Chiapas.

Vázquez-Roig P., Vicente, A., Matthias, O., Blasco, C., Picó Y. 2011. Assessment of the occurrence and distribution of pharmaceuticals in a Mediterranean wetland (L'Albufera, Valencia, Spain) by LC-MS/MS. *Anal Bioanal Chem.* 400:1287–1301.

Vieno, N., Tuhkanen, T., y Kronberg, L. 2006. Removal of pharmaceuticals in drinking water treatment: effect of chemical coagulation. *Environmental Technology*, (27) ,183-192.

Vidales C. J. A. Humberto Rodríguez Fuentes. Juana Aranda Ruiz y Rodolfo A. García Zambrano. 2010. Pantanos construidos para tratamiento de agua residual municipal. Facultad de Agronomía, de la Universidad Autónoma de Nuevo León. En Nuevo León, México. *CONCYTEG* 5(60): 560-569

Wallace Scott D, Kadleck Robert. 2009. *Treatment Wetland*. Second edition. CRC Press. Taylor and Francis Group. Boca Raton London New York.

White John R., Marco A. Belmont, and Chris D. Metcalfe, 2006. "Pharmaceutical Compounds Wastewater: Wetland Treatment as a Potential Solution". *The Scientific Journal*, Vol. 6 Pages 1731-1736. Ontario Canadá.

Zwiener, C., y Frimmel, F. 2000. Oxidative treatment of pharmaceuticals in water. *Water Research*, (34), 1881-1897.

Yocum D. 2013. *Manual de Diseño: Humedal Construido para el Tratamiento de las Aguas Grises por Biofiltración*. Bren School of Environmental Science and Management, University of California, Santa Barbara, EE.UU. [En línea][Consultado noviembre 2014] Disponible en: <www.cienciasambientales.com/.../manual-de-diseno-humedal-construido>

XII. ANEXOS

MUESTRA DE HOJA DE CUSTODIA, EN EL MUESTREO

CONAGUA COMISION NACIONAL DEL AGUA		ORGANISMO DE CUENCA FRONTERA SUR DIRECCION TECNICA SUBDIRECCION DE CALIDAD DEL AGUA E IMPACTO AMBIENTAL LABORATORIO DE CALIDAD DEL AGUA FRONTERA SUR										No. de Folio F-IPM-3-2			
CADENA DE CUSTODIA EXTERNA-RECEPCION DE MUESTRAS DISEÑO Y CONSTRUCCION de un Sistema de Cuatros - Humedal para eliminar Difenileno y Pictocinona en A.R.												RECIPIENTES DE MUESTREO		TOTAL DE RECIPIENTES	
LABORATORIO: <i>CRCAFS</i>		DIRECCION: <i>Corretera a Cuicatlan Km. 1.5 Tuxtla Gutz</i>		ST		DBO ₅		DQD		ALC		OD			5
TELEFONO:		FECHA: <i>24-08-20</i>		HORA: <i>11:00</i>		MANTIZ:		TIPO DE AGUA: <i>Residual</i>		pH (<2, >12): <i>2.0</i>		Reactivos: HCl, H ₂ SO ₄ , HNO ₃ , NaOH, etc		TOTAL DE RECIPIENTES	
IDENTIFICACION DE LAS MUESTRAS		1. <i>Tanque Alim. a Biodigestor</i>		2. <i>Salida del Biodigestor</i>		3. <i>Salida del Humedal</i>		<input type="checkbox"/> Residual <input type="checkbox"/> Ambiental <input type="checkbox"/> Residual		<input type="checkbox"/> Hielo <input type="checkbox"/> Hielo <input type="checkbox"/> Hielo <input type="checkbox"/> Hielo		<input type="checkbox"/> sulfato <input type="checkbox"/> nitrato <input type="checkbox"/> yodo			
NOMBRE DEL MUESTREADOR <i>A Susi Hiceli N.</i>		PRESERVACION		CONSERVACION EN HIELO		Nombre		Fecha		Nombre		Fecha		Nombre	
FIRMA		Nombre		hora		firma		hora		Nombre		Fecha		Nombre	
OBSERVACIONES		Nombre		hora		firma		hora		Nombre		Fecha		Nombre	
PARAMETROS FUERA DE TIEMPO DE ANALISIS		Nombre		hora		firma		hora		Nombre		Fecha		Nombre	
NOMBRE Y FIRMA DE QUIEN AUTORIZA SE REALICEN LOS ANALISIS.															

FECHA DE MUESTREO: 2014-08-20 NOMBRE/RUBRO MUESTREADOR: A. SESI ARELLANO
 FECHA RECEPCION: _____ NOMBRE/RUBRO RECEPTOR: _____
 HORA RECEPCION: _____ TIPO DE AGUA POTABLE: DESECHO OTRA _____
 ESTUDIO: BIOSSEGURIDAD DE UN S.I.T. VALIDAZ DEL ANALISIS: RUTINA O MONITOREO INVESTIGACION EMERGENCIA CUAL CONTROL PREVENTIVO
Arroyo - Humedal Para el cultivo de la papa y la papa

NO	PROCEDENCIA	HORA	COLOR AGUA	OLOR SI NO	GASTO SI NO	BURBUJA SI NO	TRANSPARENCIA (m)	materia flotante (A/P)	TEMPERATURA		pH U	Potencial REDOX (mV)	COND. US/cm ²	SOT mg/L	OD mg/L	RECIPIENTES DE MUESTREO					
									AGUA	AAMB						ST	CYA	NH ₃	ALCALINIDAD	DUREZA	HH
1	Topque Arroyo	13:15		-					22.6	0.0	7.0	/	/	/	1	1	1	1	1	5	5
2	Salida de Bioabasto			-					21.9	0.0	7.0	/	/	/	1	1	1	1	1	5	5
3	Salida de Humedal			-					26.8	0.0	7.0	/	/	/	1	1	1	1	1	5	5

PARAMETROS A DETERMINAR: _____

[Handwritten signature]

Cuadro 14. Datos de los parámetros de referencia medioambiental: Temperatura, pH, en el Sistema experimental.

Registro de datos de operación del Sistema anaerobio-humedal experimental en posgrado-Unach							
Número de registro	Temperatura °C					pH	
	ambiente (expuesta al sol)	agua biodigestor	agua humedal	raíz planta	grava	agua biorreactor	agua humedal
1	30	25.8	25	25	27	7	7
2	31	24	24.5	24	28	7	7
3	28	23	24	22	27	7	7
4	28	23	24.5	25	26	7	7
5	27	24	25	24	25	7	7
6	27.5	23	24	23	25	7	7
7	28	25	26	24	26	7	7
8	28.5	25.7	26	25	26	7	7
9	29	25	26	25	27	7	7.5
10	29.8	26	25.8	24	26	7	7.5
11	31.8	27	26.6	24	38.8	6.5	7
12	39.2	30	36.6	26	37	6.5	7
13	38.8	31	32	25.6	36.8	6	7
14	35.7	25.9	27.4	29.7	36.7	6.5	7
15	44.6	30.2	31.4	28.8	42.2	6	6.5
16	42.2	28.3	32.8	25.8	39	6	7
17	42.8	31.7	28	25.8	38.8	6	7
18	41.8	28	26	24	37	6	7
19	33.5	30.3	25.8	23.8	28	6	6.5
20	36.1	28.9	25	26.4	31.6	6	6.5
21	35.3	27.1	25.8	25.3	37.2	6.5	7
22	38.8	33.7	26.3	26.8	36.8	6.5	7
23	42.5	32.7	26.7	31.3	42	6	7
24	33.5	29.3	30	23	32.3	6.5	7
25	33.6	28.2	27.8	33.2	35.7	6.5	7
26	38.7	28	29.1	29.3	36	7	7
27	39.8	27.4	28.1	36.6	40.2	6.5	6.5
28	39	28	26	34	40	6	7
29	40	27	26	35.6	41	6.5	6
30	38.3	30.3	27	31.8	40.6	6.5	6
31	41.2	31	26	37	41	6.5	6
32	47	29.5	27.1	34.4	41.6	6.5	7
33	36.5	29.8	31	31.6	33.5	6	6.5
34	38.6	31.2	29.2	34.5	39	6.5	7
35	29	28.3	28	28.3	30.2	6.5	7

36	29	26.3	26	24.3	25	6	6.5
37	32.3	32	30.6	24.2	33	6.5	6.5
38	37.8	31	33	26.3	43	7	7
39	38.9	30.3	31.7	26.3	36.3	6.5	7
40	44.6	32.4	33.1	34.6	45	6.5	6.5
Desviación	5.65	2.86	2.98	4.36	6.20	0.38	0.34
Promedio	35.69	28.23	27.77	27.73	34.45	6.51	6.85

Cuadro 15. Resultados de los análisis de DBO₅ del agua ARS tratada por el Sistema Integral anaerobio-humedal.

Parámetro	Fecha	Tanque alim. Biodigestor	Salida de Biodigestor	Salida humedal
DBO5 (mg/L)	28/05/2014	150.65	80	10.4
DBO5 (mg/L)	05/06/2014	189	92.4	13.01
DBO5 (mg/L)	17/06/2014	143.825	77.144	13.38
DBO5 (mg/L)	23/07/2014	164.69	68	18.66
DBO5 (mg/L)	30/07/2014	159.44	70.34	11.68
DBO5 (mg/L)	20/08/2014	162.18	78.68	13.28
DBO5 (mg/L)	27/08/2014	145.87	27.87	7.37
DBO5 (mg/L)	03/09/2014	140.93	13.23	18.53
DBO5 (mg/L)	24/09/2014	130.84	10.36	10.81
Promedio		154.16	57.56	13.01
Desviación estándar		17.042656	31.41212669	3.6713962

Cuadro 16. Resultados de los análisis de OD del agua ARS tratada por el Sistema Integral anaerobio-humedal.

Parámetro	Fecha	Tanque alim. Biodigestor	Salida de Biodigestor	Salida humedal
OD(mg/L)	28/05/2014	10.33	0.39	5.7
OD(mg/L)	05/06/2014	7.8	0.41	0.84
OD(mg/L)	17/06/2014	8.6	0.37	3.79
OD(mg/L)	23/07/2014	5.6	0.45	2.94
OD(mg/L)	30/07/2014	6.3	0.5	5.7
OD(mg/L)	20/08/2014	5.7	0.42	4.16
OD(mg/L)	27/08/2014	6.9	0.3	5.63
OD(mg/L)	03/09/2014	7.3	0.225	2.92
OD(mg/L)	24/09/2014	7	0.35	4.24
Promedio		7.28	0.38	3.99
Desviación estándar		1.49238437	0.142557006	1.613966

Cuadro 17. Resultados de los análisis de DQO del ARS tratada por el Sistema Integral anaerobio-humedal.

Parámetro	Tanque alim. Biodigestor	Salida de Biodigestor	Salida humedal
DQO (mg/L)	144.00	79.20	43.84
DQO (mg/L)	144.06	79.23	41.73
DQO (mg/L)	144.12	57.00	48.04
DQO (mg/L)	134.51	73.98	43.24
DQO (mg/L)	129.71	71.34	40.83
DQO (mg/L)	127.30	96.24	39.63
DQO (mg/L)	124.90	57.65	38.43
DQO (mg/L)	115.20	63.36	33.60
DQO (mg/L)	120.05	66.03	48.03
Promedio	131.54	71.56	41.93
Desviación estándar	10.8599506	12.42771794	4.5823281

XIII. PRODUCTO DE LA TESIS

Revisión de tecnologías para el tratamiento de aguas residuales incluyendo algunos fármacos

¹ Miceli-Montesinos Auzania Susi, Najera Agullar Hugo Alejandro

² Rojas Valencia María Neftalí, Luz Idalia Quintero López

³ Orantes García Carolina

Nota sobre los autores

¹ Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas. Escuela de Ingeniería Ambiental. Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas. Libramiento norte poniente No. 1150, CP. 29039, Ciudad universitaria, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. E-mail: perla02mx@yahoo.com.mx; hnajera72@hotmail.com

² Universidad Nacional Autónoma de México. Instituto de Ingeniería de la UNAM, Coordinación de Ingeniería Ambiental Edificio 5, cubículo 212. Avenida Universidad # 3000. Colonia Coyoacán, Distrito Federal, México. Tel. 55 52-56-23-36-00 ext. 8663. E-mail: nrov@pumas.ingen.unam.mx; lucyloqui54@hotmail.com

³ Facultad de Ciencias Biológicas, Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas, Libramiento Norte Poniente N°1155, Colonia Lajas Maciel, Código Postal 29039, Chiapas, México. carolina.orantes@unicach.mx



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CHIAPAS



Tuxtla Gutiérrez, Chiapas.

Octubre, 2014.

Carta de Aceptación.

Auzania Susi Miceli Montesinos

PRESENTE

La Universidad Autónoma de Chiapas, hace de su conocimiento que hemos grabado en la Coordinación Editorial de la Revista Espacio I+D *Innovación más Desarrollo*, ISSN: 2007-6703, un Reportaje denominado: “**Tratamiento de aguas residuales a través de medios naturales (UNACH-UNICACH)**”, con contenidos en imagen sobre su investigación y comentarios personales (audio) suyos a lo largo del video.

El cual ha sido aprobado por el Comité de la Actividad Editorial Digital de esta casa de estudios, y será publicado en la Revista Número 6, el próximo día 23 del mes en curso, en www.espacioimasd.unach.mx

Sin otro particular, agradecemos su valiosa colaboración en nuestra publicación y la invitamos a continuar formando parte de este espacio.

ATENTAMENTE

“Por la conciencia de la necesidad de servir”



Mtra. Lucía León Brandi

Directora

Espacio I+D *Innovación más Desarrollo*



latindex



AÑO DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CHIAPAS
Y DEL DR. MANUEL VELASCO SUÁREZ



www.unach.mx | Boulevard Belisario Domínguez Km. 1081, Sin Número - Terán, Tuxtla Gutiérrez Chiapas. México, C.P. 29050 - Tel: (961) 6 17-80-00

2^{da}

Conferencia Panamericana
de sistemas de humedales para el
tratamiento y mejoramiento de la
calidad del agua

**EL INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA
Y
LA UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA**

Certifican la asistencia y participación de

Auzania Susi Miceli Montesinos

Con la presentación oral:

Eliminación de contaminantes fármacos de aguas residuales por medio de sistemas de humedales.

Miceli-Montesinos A. Susi, Rojas-Valencia Ma. Neftalí, Avril Picazo Alfaro, Nájera-Aguilar Hugo, Orantes García Carolina, Escobar Castillejos Daisy, Guillén Trujillo Hugo Alejandro

Segunda Conferencia Panamericana en Sistemas de Humedales para el Manejo, tratamiento y mejoramiento de la calidad del agua 2014, realizada en la ciudad de Morelia, México, del 9 al 12 de Junio, en el Multicentro Holiday Inn, Morelia.



Armando Rivas Hernández
Comité Organizador



Diego Paredes Cuervo
Comité Organizador





SISTEMA BIOLÓGICO-HUMEDAL PARA ELIMINAR CONTAMINANTES EMERGENTES EN AGUAS RESIDUALES TRATADAS

Miceli Montesinos A.Susi¹; Rojas-Valencia Ma. Neftali²; Orantes García Carolina³; Escobar Castillejos Deisy³; Guillén Trujillo Hugo⁴; Rodríguez Nava Celestino Odín⁵; Enriquez Fuad Ale⁵

¹ Facultad de Ingeniería, Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas. Libramiento norte poniente No. 1150, CP. 29039, Ciudad universitaria, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas.

² Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México. Coordinación de Ingeniería Ambiental Edificio 5, cubículo 212. Avenida Universidad # 3000. Colonia Coyoacán, Distrito Federal, México. Tel. 55 52-56-23-36-00 ext. 8663.

³ Instituto de Ciencias Biológicas, Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas. Libramiento norte poniente No. 1150, CP. 29039, Ciudad universitaria, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas.

⁴ Facultad de Ingeniería, Campus, Universidad Autónoma de Chiapas. Boulevard Belisario Domínguez, kilómetro 1081, Sin número, Terán. Tuxtla Gutiérrez. Ciudad universitaria. Chiapas, México, C.P.29050.

⁵ Departamento de Ingeniería en Sistemas Ambientales. Av. Wilfrido Massieu s/n. Unidad Profesional Adolfo López Mateos C.P. 07738. Tel. 57296000 ext. 52301

amicelimontesinos@gmail.com, nrov@pumas.ingen.unam.mx, c_orantes@hotmail.com,
guillenhugo@hotmail.com, daisvc@hotmail.com, crodriguezna@ipn.mx

**La Asociación Mexicana de Ingeniería, Ciencia y Gestión Ambiental A.C.
- AMICA - otorga el presente:**

CONSTANCIA

A: A. SUSI MICELI MONTESINOS; NEFTALI ROJAS VALENCIA; CAROLINA ORANTES GARCÍA; DEISY ESCOBAR CASTILLEJOS, HUGO A. GUILLÉN TRUJILLO, CELESTINO ODÍN RODRÍGUEZ NAVA, FUAD ALE ENRIQUEZ

Por el Trabajo Presentado

"SISTEMA BIOLÓGICO-HUMEDAL PARA ELIMINAR CONTAMINANTES EMERGENTES EN AGUAS RESIDUALES TRATADAS"

En el 2º Congreso Nacional AMICA "Innovación y Compromiso Ante los Retos Ambientales"

Puebla, Puebla. México 21, 22 y 23 de octubre de 2015

Ing. Gabriel Navarro Guerrero
COORDINADOR LOCAL DEL CONGRESO

Dra. Alejandra Martín Domínguez
DIRECTORA TÉCNICA

Dra. Pilar Tello Espinoza
PRESIDENTA DE AMICA